INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24 . N° 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (1), 1-31.

SUR L'ÉNERGIE ACTIVE EN PHOTOSYNTHÈSE. SON UTILISATION PAR DES GRAMINÉES AU COURS DE LEUR DÉVELOPPEMENT

Cas particulier de peuplements de blé [1]

Ch. BALDY

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

2e PARTIE

Croissance d'un peuplement de blé. Évolution de la photosynthèse

I. — ORGANOGENÈSE. DIFFÉRENCES GÉNÉTIQUES ET MORPHOLOGIQUES ENTRE BLÉS

Développement des feuilles

Le développement des feuilles du Blé après la levée a été remarquablement décrit par Williams (1960, 1966), qui a étudié en détail l'évolution de chaque feuille, de son initiation à sa sénescence, ainsi que les relations histologiques existant entre feuilles et épis. D'autre part, Lupton *et al.* (1967) ont montré comment l'origine génotypique des Blés agit sur leur vitesse de croissance, et Puckridge (1970, 1971) a publié des articles remarquables sur l'évolution de la photosynthèse en conditions naturelles, dans des peuplements de Blé.

Les trois premières feuilles sont initiées dès la germination ; leur *phyllochrone* dépend de la température moyenne : il est de 5 à 7 jours en conditions naturelles

[1] La première partie de ce mémoire a paru dans le n° 6, 1972, des *Annales agronomiques*.

(BUNTING et DRENNAN, 1965). Au **stade A** (défini par JONARD *et al.*, 1952), toutes les feuilles sont initiées. On observe une augmentation considérable de la teneur en acide ribonucléique de chaque feuille au début de sa croissance : cette phase de multiplication cellulaire est suivie d'une phase de grandissement des cellules, qui part de la base de la feuille. Elle cesse au moment où commence la croissance de l'organe suivant (WILLIAMS et RIJVEN, 1965). Un entre-nœud ne grandit qu'à partir du moment où la feuille de même niveau a achevé sa croissance (VINCENT, 1962).

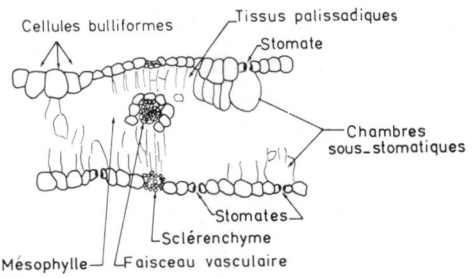


FIG. 18. — *Coupe schématique d'une feuille de Blé situant les groupes cellulaires*

Les conditions climatiques régnant au moment de la *morphogenèse* d'une feuille peuvent modifier son développement ultérieur (FRIEND et POMEROY, 1970). Ainsi, une réduction pendant 7 jours de l'énergie lumineuse incidente (exprimée en lux dans l'expérience citée : 7 000 au lieu de 30 000) suffit à modifier la feuille culmaire, qui prend les caractères d'une feuille d'ombre : chaque cellule est plus volumineuse. Ces modifications apparaissent irréversibles quand on repasse en éclairage normal (WALPOLE et MORGAN, 1971). Par ailleurs, les feuilles de Blé sont plus épaisses et moins grandes sous un fort éclairement, plus minces sous une faible lumière, surtout si celle-ci est riche en infrarouge. GESLIN (1944) avait déjà mis en évidence cet effet, à l'échelle de la plante. On observe aussi des modifications de la structure des tissus palissadiques (CHONAN, 1965, 1966).

Les feuilles de Blé sont amphistomatiques, et le nombre de stomates par unité de surface est une caractéristique spécifique (ANDELIC *et al.*, 1970 ; DOROFEEV et GRADCHANINOVA, 1971 ; FRIEND et POMEROY, 1970 ; KHAN et TSUNODA, 1970 *a*). La densité varie de 40 à 80 stomates par millimètre carré dans le genre *Triticum*, mais la variation est faible entre cultivars d'origine voisine, placés dans des conditions standard de culture. DE PARCEVAUX (1972) en trouve 40 $\pm$ 10 mm^{-2} sur la face supérieure, et 48 $\pm$ 10 sur la face inférieure de plusieurs Blés tendres français d'hiver et de printemps. Les figures 18 et 19 illustrent leur morphologie. Cette variation du nombre de stomates est liée à plusieurs facteurs : stade morphogénétique de différenciation du limbe (WILSON, 1966) ; conditions de milieu pendant le développement du limbe (TEARE *et al.*, 1971) ; origine génétique du cultivar (ANDELIC *et al.*, 1970). Ces caractères agissent aussi sur la formation du parenchyme palissadique (CHONAN, 1965).

EVANS et DUNSTONE (1970) ont souligné l'influence exercée par la polyploïdie sur le développement de chaque feuille en surface, sur leur durée de vie, l'importance des migrations et le poids de chaque grain. Mais le grandissement de variétés cultivées (tétraploïdes ou hexaploïdes) paraît s'accompagner d'une réduction de la photo-

synthèse apparente par unité de surface de feuille, comme l'a montré PLANCHON (1968).

L'origine écologique du Blé joue un rôle considérable dans le *grandissement* des feuilles ; ainsi les Blés suédois ont une croissance normale de ces organes pour des températures plus basses que les Blés méditerranéens (EVANS et DUNSTONE, 1970 ; KHAN et TSUNODA, 1970 *c* ; KOLDERUP, 1970 ; PLANCHON, 1971). Il en va de même pour la plupart des graminées (CHARLES-EDWARDS *et al.*, 1971, par exemple). Nous reverrons ceci plus loin.

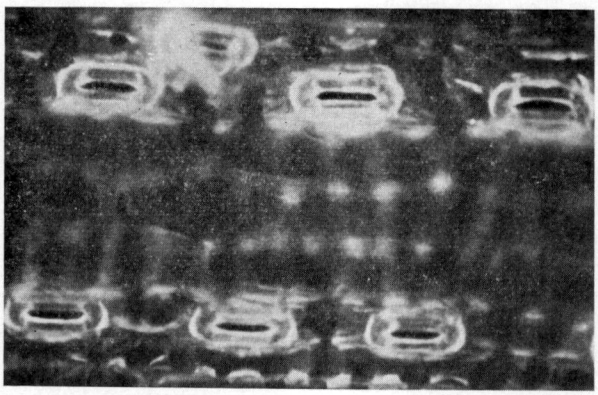


FIG. 19. — *Photographie de la surface d'une feuille de Blé, montrant les stomates ouverts* (d'après de PARCEVAUX, 1972)

Le rendement photosynthétique net de certaines variétés, qui présentent un arrangement relativement compact des cellules du parenchyme, de type « panicoïde », est supérieur à celui des variétés courantes, « festucoïdes ». Cet arrangement se rencontrerait particulièrement chez les variétés sauvages originaires de bioclimats semi-arides (KHAN et TSUNODA, 1971). La structure des cellules de transfert de la tige et

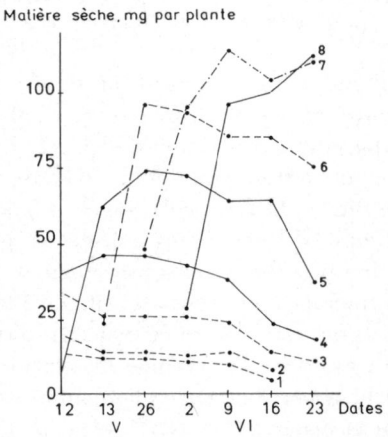


FIG. 20. — *Évolution de la matière sèche des feuilles vertes successives* (1 à 8) *de Blé de printemps* (Moyenne de 30 feuilles) (D'après STREBEYKO *et al.*, 1961)

de la gaine diffère aussi selon les cultivars, ce qui peut créer des différences dans les vitesses de migration (O'Brien et Zee, 1971).

Les feuilles âgées des graminées sont généralement situées à la base des plantes, et sont de ce fait ombragées. Leur exposition à la pleine lumière permet de constater que leur physiologie a évolué, et qu'elles deviennent incapables d'utiliser les forts rayonnements (Brown *et al.*, 1966).

La *sénescence* des feuilles se traduit notamment par une modification du rapport des poids des parois cellulaires et du protoplasme, et une chute de la teneur en acide ribonucléique (Williams et Rijven, 1965), une activité photosynthétique nette qui décroît très rapidement (Treharne *et al.*, 1968) et un point de compensation du gaz carbonique qui croît rapidement (Pearce, 1967).

L'évolution de la *matière sèche* de chaque feuille de Blé au cours de sa vie, d'après Strebeyko *et al.* (1961) est présentée sur la figure 20. La surface foliaire maximale est atteinte 8 à 10 jours avant l'épiaison (chez les Blés d'hiver) ou à la floraison (chez les Blés de printemps). La surface développée des plantes (par unité de surface) peut être considérable, ainsi que le montre la figure 11 (1). Elle reste stable pendant la phase épiaison-floraison, grâce au remplacement progressif des feuilles âgées par la feuille culmaire, le dernier entre-nœud et l'épi.

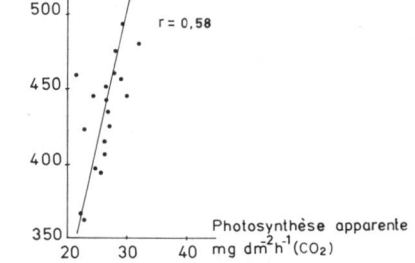


Fig. 21. — *Relation entre la masse surfacique* (mg dm^{-2} en matière sèche) *et le rendement photosynthétique* (mg CO_2 dm^{-2} h^{-1}) *de 20 génotypes d'avoines r : 0,58*
(d'après Criswell et Shibles, 1971)

La *masse surfacique* d'une feuille (exprimée en kg m^{-2} d'organe) demeure assez constante tant que la photosynthèse du limbe est normale. Elle présente généralement une fluctuation diurne, qui correspond à des phases d'accumulation, de migration ou de respiration prédominantes. Nous avons constaté nous-mêmes que la masse surfacique d'une feuille de Blé ou de Maïs, cultivée en chambre climatisée, est voisine de la moitié de celle de la feuille de même rang cultivée en plein champ, mais que des feuilles de Blé provenant de talles développés tardivement, à l'ombre des brins principaux, ont des masses surfaciques analogues à celle de Blés cultivés en conditions artificielles. Cette observation est confirmée par Meidner (1970). Criswell et Shibles (1971) ont mis en évidence sur Avoine la relation existant entre la masse surfacique et la photosynthèse nette de la feuille culmaire, observation qui recoupe celle de Pearce (1969) sur la luzerne (fig. 21).

(1) Cf. 1e partie Baldy, *Ann. agron.* 6, 1972.

II. — ÉVOLUTION DE LA PHOTOSYNTHÈSE DU BLÉ AU COURS DE SA VIE

A. — *Rappels concernant la photosynthèse et les phénomènes connexes chez le Blé*

Une étude d'ensemble des *méthodes de mesure de la photosynthèse* vient d'être publiée par SESTAK, CATSKY et JARVIS (1971). Elle constitue la meilleure base d'information actuellement disponible. Indiquons simplement que les techniques, très variées, font appel à des méthodes gravimétriques, titrimétriques, gazométriques et à des traceurs radioisotopiques.

La plupart des graminées tempérées (Blé, Orge, Avoine, Seigle...) et le Riz, d'origine tropicale, utilisent le cycle de photosynthèse de *Calvin-Benson*. Des recherches sont poursuivies actuellement sur la biochimie des réactions intermédiaires, l'action spécifique de chaque longueur d'onde (GAUDILLÈRE et COSTES, 1971) et la biophysique des échanges gazeux entre le milieu et la feuille (CHARTIER, 1970). Des études écologiques s'intéressant à l'évolution *macroscopique* des processus de photosynthèse et de mise en réserve au niveau de la *plante* et de la *communauté* sont également poursuivies (BALDY, 1973 *b*).

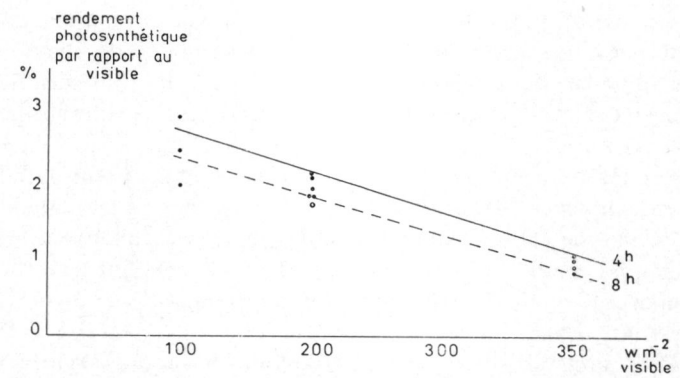


FIG. 22. — *Évolution du rendement de la photosynthèse en fonction de l'énergie incidente chez le Bl* (d'après BALDY et LE BUHAN, 1972)

L'étude de la *photosynthèse brute* se situe essentiellement au niveau biochimique : on peut ainsi comptabiliser les gains et les pertes constatés. Les mesures différentielles du gaz carbonique (ou de l'oxygène), et les méthodes gravimétriques différentielles (prise de poids pendant un temps donné, cf. BALDY, 1971) ne permettent de mesurer que la *photosynthèse apparente*, y compris éventuellement la respiration à l'obscurité. On enregistre ainsi la mise en réserve des produits élaborés.

MEIDNER (1970) a montré que la photosynthèse apparente s'annule (à 20 °C et 300 vpm de gaz carbonique) pour 500 lux (ou 20 W m^{-2} d'énergie dans le visible), et qu'une feuille isolée placée sur une normale au rayonnement est saturée en lumière visible pour des énergies voisines de 175 W m^{-2} (fig. 22). Au-delà, la *vitesse* d'absorption

du gaz carbonique n'augmente plus, et décroît même quand on passe à des niveaux d'énergie très importants (supérieurs à 600 W m^{-2} visible) dans le cas du Blé (BALDY et LE BUHAN, 1972 ; DJAVANCHIR, 1971).

Des *modifications de la photosynthèse* sont aisément obtenues en atmosphères artificielles, et en ce domaine, de nombreux travaux sont réalisés sur le Blé (et d'autres plantes).

Les modifications de la *teneur en oxygène* de l'air par rapport à la normale (21 p. 100) influent considérablement sur le rendement : le rendement augmente de 30 p. 100 dans de l'air contenant 2-3 p. 100 O_2, mais s'annule dans une atmosphère contenant 99 p. 100 O_2 (JOLLIFFE et TREGUNNA, 1968 ; BULLEY, 1970 ; JOLLIFFE, 1971).

On a mis en évidence un *point de compensation* Γ pour le gaz carbonique (DOWNTON et TREGUNNA, 1968 ; MEIDNER, 1970 ; JOLLIFFE, 1971), voisin de 50 vpm pour le Blé (MOSS *et al.*, 1969 ; DVORAK et NATR, 1971). Celui-ci *s'annule* dans de l'air contenant 2 p. 100 (ou moins) d'oxygène et croît de 30 à 200 vpm quand la teneur en oxygène passe de 3 à 80 p. 100 (MENZ *et al.*, 1969 ; BULLEY et TREGUNNA, 1970).

La photosynthèse *apparente* chez le Blé (comme chez beaucoup d'autres plantes) *augmente* avec la teneur en gaz carbonique de l'air (FORD et THORNE, 1967.) L'augmentation atteint 50 p. 100 à 1 000 vpm et 65 p. 100 à 3 300 vpm dans le cas de l'Orge. Pour le Blé, la saturation est atteinte pour 1 500 vpm (HUBIK, 1971), et, au-delà, le rendement est réduit. Mais ces expériences, faites en air normal, devraient être reprises à faibles teneurs en oxygène.

L'activité photosynthétique du Blé dépend aussi du niveau de son *alimentation minérale* (NATR, 1972). Cette dernière et la teneur en gaz carbonique doivent croître parallèlement pour que la production photosynthétique reste maximale. Pour la Tomate et le Soya, la vitesse d'absorption de ^{15}N et de ^{32}P varie linéairement avec la concentration en CO_2 de l'air jusqu'à 600 vpm, puis décroît ensuite jusqu'à 1 200 vpm (GHODDOUSSI, 1970).

Les Blés cultivés ont une *teneur en azote* plus faible et souffrent plus d'une carence que les variétés sauvages (KHAN et TSUNODA, 1970 *a*, *b*, *c* ; 1971). Mais chez les Blés cultivés, le volume de chaque cellule est plus grand et la photosynthèse par feuille meilleure. Selon les conditions d'alimentation minérale pendant leur développement, les feuilles pourront avoir des réactions xéromorphiques plus ou moins marquées (MARENKOV *et al.*, 1971).

Tout déficit minéral provoque une réduction de la photosynthèse apparente, et TAKANO et TSUNODA (1971) pensent que, pour l'azote au moins, il s'agit d'un effet indirect sur la nitrate-réductase. WATANABE et YOSHIDA (1970) ont montré que les carences agissent sur la photo-phosphorylation.

Des artefacts dus aux techniques de mesure sont possibles : nous avons pu montrer que des gradients de photosynthèse existent entre la base et l'extrémité des feuilles (BALDY et LE BUHAN, 1971). Des photosynthèses apparemment différentes peuvent être provoquées par une alimentation instantanée insuffisante en gaz carbonique, par une faible turbulence au voisinage des feuilles dans les chambres de mesure, ou par des différences d'âge physiologique des organes comparés.

La respiration à l'obscurité est connue depuis près de deux siècles, et l'étude de SACHS (1874) reste valable. D'assez nombreux travaux concernent le Blé.

La respiration peut être modifiée en appliquant à des plantules des *déficits hydriques* croissants (KAUL et CROWLE, 1971). Elle est augmentée de 20 p. 100 à un

déficit de 2 bars, mais est diminuée de 50 p. 100 à 10 bars. On constate aussi que les teneurs en citrate et en malate sont modifiées : en particulier, celui-ci devient moins abondant dans les racines, mais les tiges en contiennent davantage.

La respiration, qui est liée à l'activité physiologique du Blé, n'est pas un phénomène passif. KHISAMUTDINOVA et VASIL'EVA (1970) ont montré qu'elle se réduit progressivement pendant la phase d'endurcissement des Blés d'hiver, de 55 à 14 10^{-6} m^3 de CO_2 par kg de matière sèche et par seconde, à des températures voisines de 1°C. Au printemps, à 10° C, elle s'élève à 215. USOVA et BORZHOVSKAYA (1970) ont montré qu'il s'agit d'une action sur la phosphorylation pendant l'endurcissement, et que l'effet dépend du caractère *hiver* plus ou moins marqué des génotypes de Blés. SVEC (1970) arrive aux mêmes résultats sur Orges d'hiver en appliquant des températures *identiques* à l'automne et au printemps.

Le rapport de la respiration et de la température (exprimée par son Q_{10}) à l'intérieur d'une même espèce botanique peut varier beaucoup, ce qui peut avoir une grande influence sur la productivité globale (RAZORIONOV et NILOVSKAYA, 1971). Il paraît assez stable entre cultivars de même origine (SVEC, 1970).

La photorespiration est différente de la respiration à l'obscurité : on a montré que les inhibiteurs de photosynthèse bloquent la photorespiration et peu ou pas la respiration obscure (JACKSON et VOLK, 1970). Elle devient inférieure à la respiration obscure du Blé quand les températures dépassent 35° C (HOFSTRA et HESKETH, 1969), et elle est étroitement liée à la photosynthèse instantanée, par action de la glycolate-oxydase (FOCK et KROTKOV, 1969).

Les mises au point de GOLDSWORTHY (1970) et de JACKSON et VOLK (1970) ainsi que la thèse de DOWNTON (1970) permettent de comprendre les mécanismes en cause. La photorespiration commence à 2 000 lux environ (4 fois le point de compensation lumineux du Blé) et arrive à saturation à 11 000 lux (moitié de la saturation lumineuse du Blé en photosynthèse apparente).

Chez certains clones de *Dactylis glomerata* L., BULLEY et TREGUNNA (1970), et HILLIARD et WEST (1971) ont trouvé des structures assez semblables à celles présentes dans les plantes possédant le cycle des acides dicarboxyliques en C_4 (HATCH et SLACK, 1970). Des observations analogues viennent d'être présentées par KHAN et TSUNODA (1971) sur Blé. Les cellules périvasculaires forment un anneau bien individualisé, sans cependant avoir la morphologie caractéristique du Maïs ; chez ces variétés, on observe une augmentation de 30 p. 100 de la photosynthèse apparente (30 mg dm^{-2} h^{-1} de CO_2, au lieu de 20), sans qu'on note de modification du point de compensation du CO_2 Γ, qui reste voisin de 50 vpm.

En conditions naturelles, la longueur d'onde de la lumière influe peu apparemment sur la photorespiration, ni sur son point de compensation (BULLEY, 1970). Une fluctuation brusque de l'intensité lumineuse incidente provoque une émission apparente de CO_2, proportionnelle à la variation d'intensité, tout à fait semblable à celle qu'on observe au moment de l'extinction, et ce phénomène se produit même quand on fait varier la teneur en oxygène de l'atmosphère (TREGUNNA *et al.*, 1964).

Les rapports existant entre *photosynthèse apparente et transpiration*, d'une part, et les échanges gazeux d'autre part, ont fait l'objet de trois thèses récentes en Bioclimatologie (CHARTIER, 1970 ; DJAVANCHIR, 1971 ; PARCEVAUX, 1972). Ce dernier a axé particulièrement ses recherches sur les mécanismes des échanges à l'échelle du stomate.

L'action de la lumière et du gaz carbonique sur les mouvements des stomates, et leur effet sur la transpiration, sont connus depuis longtemps (HEATH et RUSSELL, 1954). Très récemment, DJAVANCHIR (1971) a mis en évidence chez le Blé, les relations existant entre transpiration instantanée et résistance stomatique en fonction de l'énergie solaire incidente normale à la feuille considérée, et l'effet de l'ombrage. La figure 23 illustre ces relations :

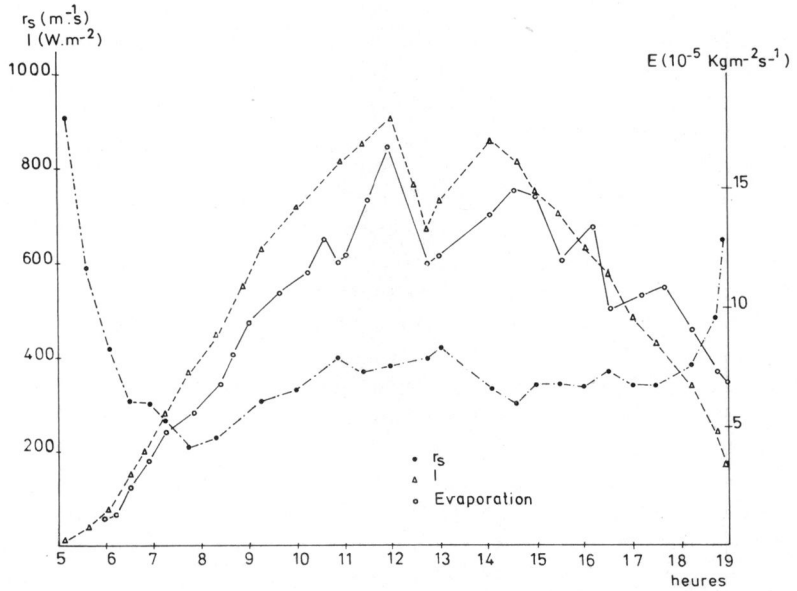


FIG. 23. — *Variations au cours de la journée de la résistance stomatique d'une feuille de Blé, de l'éclairement I reçu par cette feuille, et de l'Évapotranspiration potentielle ponctuelle* (d'après DJAVANCHIR, 1971)

On a vu précédemment que la respiration à l'obscurité croît d'abord à de faibles déficits, puis décroît : les résistances internes des feuilles augmentent plus rapidement que celles des autres organes, tant que le limbe n'est pas sénescent. HANSEN (1971) a montré qu'à — 50 bars, la résistance stomatique est de 1 000 s m^{-1} et que la résistance du mésophylle (au sens de GAASTRA, 1959) croît de façon semblable. Ces résultats sont en excellent accord avec ceux obtenus par CRUIZIAT (1972) sur Tournesol.

Des fluctuations de l'énergie lumineuse peuvent accroître le rapport photosynthèse/transpiration, notamment sous ombrage naturel, car le spectre lumineux est très modifié dans ces conditions. La photosynthèse se réduit instantanément quand on passe du soleil à l'ombre, tandis que la transpiration peut demeurer plus élevée, tant que les stomates ne se sont pas fermés (VIRGIN, 1956).

Chez le Blé, des variations cycliques affectant l'ouverture des stomates, la transpiration et le potentiel hydrique, en conditions contrôlées constantes, ont été mises en évidence par BARRS (1971) : les fluctuations sont accrues l'après-midi, et elles seraient en relation avec la vitesse de transit de l'eau des racines vers les feuilles. Cependant, VINCENT (1971) suggère que cet effet pourrait être dû à l'évolution du rapport des états du phytochrome au cours de la journée. Notons que ces résultats

sont en accord avec ceux de Mme FERRON (1971), qui a suivi en conditions contrôlées, à l'aide de ^3H_2O, la transpiration de jeunes plantules de Blé âgées de 12 jours.

En résumé, la transpiration d'une feuille de Blé dépend de son état physiologique, du stade végétatif, de l'état hydrique du sol, de la demande climatique (évapotranspiration instantanée), et du rapport éclairement/ouverture des stomates à chaque instant. Des variations importantes ont été mises en évidence entre cultivars (KHAN et TSUNODA, 1970 *b*). A l'échelle de la culture, densité de végétation et alimentation instantanée en eau jouent le rôle principal pour un cultivar donné (FISCHER et KOHN, 1966 *a*, *b*, *c*). Une fermeture durable des stomates réduit considérablement la transpiration (DJAVANCHIR, 1971). La température de la feuille augmente, mais aussi l'albedo du couvert, en raison de la variation de la teneur en eau des plantes et de la géométrie du couvert (LYKOVSKI, 1968 ; STANHILL, 1970).

B. — *Évolution de la photosynthèse des feuilles au cours de leur vie*

La durée de vie de chaque feuille paraît jouer un rôle plus important dans la production du grain que toute autre différence constatée entre cultivars (WELBANK *et al.*, 1966). Ce fait a été confirmé sur Blés sauvages et sur diverses variétés cultivées, par KHAN et TSUNODA (1970 *a*), et par PLANCHON (1969) sur des Blés tendres français. Chez les Blés sauvages, la photosynthèse apparente par *unité de surface* de feuille est excellente, mais la surface des feuilles est faible, et leur durée de vie est brève.

WALPOLE et MORGAN (1971) sur Blé, et HART et LEE (1971) sur *Cynodon dactylon* L. ont suivi la photosynthèse de feuilles de leur émergence à leur mort. Le *rendement* photosynthétique décroît quand l'énergie disponible croît ; la photosynthèse *maximale* (par unité de surface) est atteinte à l'apparition du limbe, et elle décroît très rapidement avec le grandissement foliaire. En éclairage naturel, la durée de vie des feuilles de Cynodon est de dix-huit jours, et elle s'allonge à trente-cinq jours en éclairage réduit artificiel de 22 000 lux. WATSON *et al.* (1966) avaient déjà montré que la réduction de la photosynthèse avec l'âge est plus rapide que celle de la respiration à l'obscurité : cette dernière dépend directement des températures nocturnes, mais diminue quand la feuille entre en sénescence.

HODANOVA (1970) indique que le vieillissement agit sur la photosynthèse, et OSMAN et MILTHORPE (1970) ont suivi le vieillissement de feuilles de Blé *in situ*. Le *potentiel* photosynthétique varie peu, tant que la feuille est physiologiquement active, mais la *vitesse* des processus de carboxylation diminue, et les résistances internes croissent : la photorespiration a tendance à croître avec l'âge des feuilles.

Un niveau optimal d'*alimentation* azotée des feuilles augmente leur durée de vie et leur rendement, mais la liaison entre teneur en azote et capacité de photosynthèse est étroite. Ceci se conçoit si on admet avec KULAEVA et KLYACHKO (1967) que les synthèses d'acides aminés commencent directement *dans* le cycle de Calvin, parallèlement à celles des glucides.

Pendant la phase d'endurcissement automnal, la photosynthèse reste active à des *températures* peu élevées (BARTA et HODGES, 1970 ; MALOFEEV, 1971), et les sucres s'accumulent dans les chloroplastes (TRUNOVA, 1970). Ce phénomène est peu marqué

en région méditerranéenne, où les Blés d'hiver réagissent à peu près comme les Blés de printemps. Après la dormance hivernale, la reprise printanière est rapide, et elle est directement proportionnelle à la température des feuilles, dans les limites des conditions naturelles, avec un optimum situé entre 15 et 25° C selon les cultivars (KOLDERUP, 1970).

TREHARNE *et al.* (1968) ont mis en évidence l'origine génétique de l'optimum thermique de la photosynthèse du Dactyle : les variétés méditerranéennes cultivées à 21° ont un rendement plus élevé que les variétés nordiques ; cet optimum évolue avec l'âge des plantes. NATR (1963) avait déjà montré la supériorité, à température égale, de cultivars nordiques de Blé sur des cv. tchèques, ce que KOSHKIN et BYKOV (1970) et PLANCHON (1971) ont également trouvé. Ce dernier a prouvé l'existence d'une zone thermique optimale liée à l'*origine* géographique et à la *précocité* des Blés étudiés, température d'autant moins élevée que la variété est plus précoce.

VINCENT (1971) suggère que l'évolution des formes de phytochrome dans la feuille au cours du temps pourrait se traduire par des différences de photosynthèse apparente. La *vitesse de transfert* hors des sites chlorophylliens pourrait varier aussi (NEALES et INCOLL, 1968). Il n'est pas possible d'étayer cette théorie, mais elle paraît intéressante à envisager.

On peut enfin avoir *inhibition* de la photosynthèse dans une feuille apparemment saine si une attaque de parasites (champignons, acariens...) se manifeste sur une *autre* partie de la plante ; des effets de ce type ont été mis notamment en évidence par LAST (1963) et NATR (1971.)

C. — *En conclusion*

Les différences de photosynthèse apparente constatées entre cultivars, dans des peuplements comportant des densités normales de semis (soit 600 à 800 talles par m² environ) peuvent avoir diverses origines :

— des différences de nature *intrinsèque*, liées au génotype, et portant par exemple sur la gamme plus ou moins large de températures pour lesquelles la photosynthèse est voisine de l'optimum, et sur l'intensité de la respiration nocturne et de la photorespiration à ces températures ;

— des différences *morphologiques*, comme l'aspect plus ou moins « panicoïde » des faisceaux vasculaires ;

— des différences de nature *extrinsèque*, liées à la vitesse d'évolution de chaque feuille en fonction des conditions de milieu, pouvant se traduire par des variations de la durée de vie des feuilles et de leur masse surfacique. Le fonctionnement de chaque feuille dans le peuplement dépend aussi de l'énergie photosynthétiquement active (PhAR des anglo-saxons) captée par elle, et de l'évolution de cette énergie incidente au cours de la vie de la feuille. D'autres différences de ce type, sont dues aux conditions d'alimentation des feuilles en eau et en éléments minéraux ;

— des différences de nature *mixte*, très variées, comme par exemple la structure des feuilles, qui peut modifier leur alimentation en gaz carbonique, ou le fait que certains cultivars ont la possibilité, dans certaines conditions, de mieux résister que d'autres à des conditions limites de survie.

III. — PRODUCTION PRIMAIRE ET MIGRATIONS DE LA LEVÉE A LA FLORAISON DU BLÉ

A. — *Caractéristiques du peuplement*

On a vu précédemment l'évolution du LAI et les caractéristiques de l'extinction du rayonnement dans la végétation. Le tableau 2 (cf. 1re partie, BALDY 1972, *Ann. agron.*), présente quelques résultats originaux à ce sujet. Les feuilles inférieures ne reçoivent que peu de lumière utile, de composition spectrale fortement modifiée par rapport au rayonnement incident. Des taches de soleil les atteignent cependant, vers midi surtout, et créent des conditions d'éclairement fluctuant. Il s'agit de feuilles âgées, ou développées à l'ombre, dont les caractéristiques sont assez différentes des feuilles de pleine lumière (fig. 16). Il semble que leurs échanges soient réduits aussi (RAZORIONOV et NILOVSKAYA, 1971 ; SALIN et HOMANN, 1971).

FRIEND (1969) a montré que *l'assimilation nette* par unité de surface de feuille *décroît* pendant la montaison. Aux LAI couramment atteints à l'épiaison (5 à 6 pour les feuilles, 2 à 3 pour les tiges et épis), on a vu (figures 13 et 14) que le rayonnement visible est réduit de 90 p. 100 et l'infrarouge de 60 à 70 p. 100 à 30 cm au-dessus du sol. La photosynthèse nette y est faible (1 à 5 mg dm^{-2} h^{-1}) et n'est positive que pendant 4 à 6 heures au plus (FRIEND, 1969 ; DOWNES, 1970 ; HERCHEL, 1970). *A l'échelle de la journée*, la photosynthèse des couches inférieures de feuilles est bien caractérisée par l'*intégrale* du rayonnement *visible* arrivant à ce niveau (MCCREE et LOOMIS, 1969 ; INO, 1970).

La disposition *spatiale* du feuillage joue un rôle important dans l'efficacité du peuplement : PEARCE (1967) et PEARCE *et al.* (1967) ont montré que le LAI optimal sous 80 000 lux est voisin de 12 pour des Orges à port dressé et n'est que de 4,5 pour un feuillage horizontal obtenu artificiellement en modifiant le port des plantes et la densité de semis. Mais l'efficience décroît très vite quand l'*optimum* est dépassé. Ce dernier est défini classiquement pour un éclairement par *temps clair* à *midi*.

Les *Blés de printemps* ne diffèrent des Blés d'hiver que par leur croissance continue, un développement moins important des racines et de la matière sèche totale produite. Leur photosynthèse apparente dépend dès la levée de leur optimum thermique, lui-même fonction de leur origine géographique. Cet effet paraît plus caractéristique chez les Blés de printemps que chez les Blés d'hiver. Leur croissance est généralement très rapide pendant la montaison, et leur floraison est peu décalée dans le temps par rapport à celle des Blés d'hiver.

B. — *Migrations pendant la phase végétative*

Les organes de production et d'accumulation sont relativement distincts : les augmentations de matière sèche des *feuilles* constituent des stockages transitoires : une fois les besoins des organes producteurs satisfaits, les produits s'accumulent surtout dans les *tiges* et les organes en *formation*.

Les **méthodes d'étude des migrations** sont assez nombreuses. On peut citer les plus utilisées :

— *L'ablation des organes :* mais elle peut modifier le métabolisme des plantes, ou conduire à des phénomènes de compensation. Les effets sont généralement assez différents de ceux dus à une attaque de *parasites*.

— *L'ombrage :* mais il réduit la photosynthèse de l'organe étudié, et modifie la composition et la répartition des *produits formés* dans la plante. Il est difficile d'ombrager un organe sans modifier tout l'environnement.

— *Le bloquage des migrations*, par destruction des tissus conducteurs, est utilisé depuis fort longtemps (SACHS, 1883), mais peu sur céréales. Couramment employé en U. R. S. S., sur arbres fruitiers, pour suivre l'alimentation du *fruit* par les feuilles adjacentes, il modifie peu le milieu, mais risque d'affecter à long terme le métabolisme de l'organe considéré, par accumulation de produits du catabolisme.

— *L'absorption de carbone 14* par les plantes donne de meilleurs résultats qualitatifs que quantitatifs. On lui doit une grande partie des connaissances concernant les produits de la photosynthèse. D'autres composés radioactifs (^{32}P par exemple) ont été aussi utilisés.

La **dynamique des migrations** durant la croissance du Blé commence à être bien connue, grâce surtout aux travaux de WARDLAW et de son équipe.

Pendant la phase de multiplication cellulaire et le début du développement en surface, une feuille est essentiellement alimentée par le reste de la plante (RAWSON et EVANS, 1971). Pendant sa phase de développement rapide, elle inhibe la croissance de l'organe situé immédiatement au-dessus d'elle (feuille ou entre nœud) (WILLIAMS et RIJVEN, 1965 ; VINCENT, 1962).

Les migrations ont lieu de proche en proche, chaque feuille alimentant préférentiellement l'organe le plus voisin (RAWSON et HOFSTRA, 1969). Les produits peuvent migrer des tissus photosynthétisants vers les petits faisceaux conducteurs, puis vers les vaisseaux principaux. Il faut trois heures environ pour que ce passage se fasse (PRISTUPA, 1964). A l'intérieur d'une feuille, les migrations *latérales* sont moindres que les longitudinales (ASADA *et al.*, 1960). De la feuille à l'épi, plusieurs polymérisations et dépolymérisations successives paraissent se produire, ainsi qu'un stockage transitoire dans la tige (STOY, 1963 ; WARDLAW et PORTER, 1967 ; RAWSON et HOFSTRA, 1969).

Une fois l'expansion de la feuille achevée, elle devient normalement incapable d'*importer* des sucres, sauf si des substances de croissance lui sont injectées (WARDLAW, 1968). Certains tissus peuvent produire des substances qui imposent que les migrations aient lieu vers eux seuls (LEOPOLD, 1963 ; HEW *et al.*, 1969).

Les feuilles des étages inférieurs alimentent surtout l'entre-nœud qui leur correspond et les racines (LUPTON, 1966 ; RAWSON et HOFSTRA, 1969). L'épi a de faibles exigences énergétiques avant l'épiaison ; mais ses besoins en produits élaborés (acides aminés notamment) sont importants (WARDLAW, 1963, 1968). Des défioliations pratiquées pendant la montaison provoquent une réduction de la croissance des tiges, sans influence notable sur le développement de la feuille culmaire ou sur la productivité ; on aurait un remplacement quantitatif des feuilles supprimées par les feuilles restantes (LUCAS et ASANA, 1968). Cependant l'ablation des feuilles au fur et à mesure qu'elles apparaissent retarde l'épiaison, et ce, d'autant plus que le LAI est plus réduit (DAVIDSON, 1965). Une ablation *partielle* des feuilles induit une accélération de la migration des produits hors de la partie conservée (WARDLAW, 1968).

Les migrations hors des feuilles ne sont pas du tout comparables *avant et apres* la floraison, car le réservoir constitué par l'épi ne devient fonctionnel qu'à l'*anthèse*, de sorte que la tige représente l'organe d'accumulation pendant la montaison (NEALES et INCOLL, 1968 ; WARDLAW, 1968). Tout organe est cependant susceptible de servir temporairement de zone de stockage (WARDLAW et PORTER, 1967). Après la floraison, l'épi inhibe le développement des racines (BALDY, 1973 *a*).

EVANS *et al.* (1970) ont étudié les vitesses de transfert des assimilats des feuilles vers les tiges, chez 22 Blés tétraploïdes et hexaploïdes. Dans une variété botanique, le nombre des faisceaux vasculaires n'est pas fixe, mais *Triticum aestivum* L. em. THELL en contient toujours le plus, sans liaison directe, d'ailleurs, avec le nombre d'épillets. Le nombre et les dimensions des faisceaux sont liés aux *conditions de milieu* au moment de leur différenciation. A titre d'information, la section moyenne de transfert d'un faisceau de Blé est de 80 10^{-3} mm^{-2}, et le débit équivalent est de l'ordre de 3,3 g cm^{-2} de phloème, par *heure*.

A mesure qu'elle vieillit, la feuille s'éloigne de plus en plus de l'apex ; en valeur relative, elle alimente plus les racines (DOODSON *et al.*, 1964). Quand la lumière devient trop réduite, le flux de métabolites diminue plus vite vers les racines que vers les parties aériennes, ce qui explique le faible développement des racines de plantes se développant sous ombrage (WARDLAW, 1968). Un éclairement insuffisant n'affecte le développement de l'apex qu'en dernier lieu (FRIEND *et al.*, 1962). La réduction de l'intensité lumineuse n'agit pas seulement sur l'*intensité* de la photosynthèse mais aussi sur les produits formés et sur leur distribution. Cet effet doit être dû à une insuffisance d'énergie, ou à un déséquilibre entre longueurs d'ondes, car des taux de photosynthèse réduits par manque de *gaz carbonique* accélèrent les migrations (WARDLAW, 1968).

L'importance des migrations dépend des conditions subies auparavant par la feuille : après une longue période d'obscurité, il faut plusieurs heures de photosynthèse avant que des migrations notables apparaissent hors de la feuille, et les migrations nocturnes sont d'autant plus importantes que la photosynthèse nette aura été plus forte la veille. On a également une action de la durée du jour, qui peut être importante pour le développement des céréales à contre-saison, ou en climats géographiques à jours courts.

Les *différences de photosynthèse apparente* entre cultivars, pendant la croissance, peuvent s'expliquer en grande partie par des optimums thermiques différents de respiration à l'obscurité et de photorespiration (MEIDNER, 1970), ainsi que par des vitesses de migration différentes. La sensibilité plus ou moins grande des cultivars à la sécheresse, comme aussi leur précocité, peuvent jouer un rôle important. Ces facteurs sont liés au *génotype*, et peuvent être reliés directement aussi à l'origine *géographique* du Blé. D'autres différences sont dues aux conditions *climatiques* régnant fortuitement à tel ou tel stade précis de la différenciation des organes : manque de lumière, sécheresse... ou à des attaques *parasitaires* qui réduisent les feuilles ou les racines.

Le type plus ou moins « panicoïde » de certaines variétés botaniques qui est déjà connu pour agir sur la photosynthèse apparente, peut avoir aussi une action sur la vitesse de migration des métabolites. Des données à ce sujet seraient à rassembler, pour pouvoir sélectionner des types de Blés plus productifs à partir de ce caractère (WILSON, 1970 ; CRISWELL, 1971 ; BLACK, 1971).

IV. — ÉVOLUTION DU BLÉ APRÈS LA FLORAISON ET ALIMENTATION DE L'ÉPI

A la floraison, la surface susceptible de photosynthétiser a atteint son maximum. Elle se réduit ensuite progressivement jusqu'à la maturation. Il est donc important de connaître la part de chaque organe dans l'alimentation du grain.

A. — *Contribution de chaque organe à la formation du rendement*

Une grande partie des produits assimilés *après la floraison* migrent dans l'épi. De nombreuses expériences ont été faites, non seulement sur le Blé, mais sur la plupart des autres céréales (y compris le Maïs et le Riz) et de nombreuses graminées tempérées et tropicales. Le pourcentage des migrations dépend cependant de la saison, de l'éclairement et de la variété.

Des photosynthèses différentes ont été mises en évidence entre cultivars de Blés par ASANA et MANI dès 1950. Ces auteurs ont souligné le rôle important joué par les *tiges* dans l'alimentation de l'épi. D'autres facteurs intéressent aussi cette alimentation : par exemple les produits : *surface des feuilles* × *intensité de la photosynthèse ; surface de la feuille culmaire* × *durée de vie* de cette feuille après la floraison. ASANA et MANI (1955) ont établi aussi qu'une partie importante du rendement est à attribuer à la photosynthèse de l'*épi* et de ses *barbes*.

En semis denses, on observe (en valeur relative) des migrations plus importantes des feuilles de la base des tiges vers l'épi, mais par contre une alimentation plus faible des racines (WARDLAW, 1968).

Les contributions des feuilles âgées et des talles herbacés ont été estimées de façon assez différente, selon les méthodes employées. Il faut souligner avec HOPKINSON (1966) que l'ablation des feuilles âgées provoque une modification dans le comportement physiologique de la plante, car leur production brute, peu importante *quantitativement* joue un rôle non négligeable dans les *régulations* de la plante. Elles alimentent peu ou pas l'épi (des études à l'aide d'éléments marqués l'ont montré), mais sont indispensables à la nutrition des racines et de la base des tiges. Leur disparition prématurée affaiblit ces organes, et aboutit à une redistribution d'une partie des produits de la feuille culmaire : les migrations deviennent basipètes, au lieu de demeurer acropètes (WARDLAW, 1968).

En revanche, DAVIDSON (1965) et BREMMER (1969) concluent à l'inutilité des *talles herbacés* tardifs, dont les rendements sont presque nuls. Plusieurs expériences concordantes ont permis de montrer que les produits photosynthétisés par ces organes *ne passent pas* dans la tige principale, à l'exception de quelques acides aminés. A leur mort, on a une perte nette de substance, ainsi que nous l'avons montré nous-mêmes (BALDY, 1973 *b*), par prélèvements échelonnés effectués au cours d'études de compétition.

De nombreux auteurs ont effectué la défoliation partielle ou totale d'un ou plusieurs talles de plants de Blé : ainsi DAVIDSON (1965) a réduit en conditions natu-

relles le LAI de 12 à 3 et constaté que le nombre de grains par épillet et le poids de chaque grain sont réduits (par rapport au témoin), quand les feuilles sont totalement ôtées, alors que l'ablation longitudinale de demi-limbes ne modifie pas le rendement. Sur le Blé dur, en Inde, RASTOGI et SINGH ont effectué la défoliation totale des tiges à l'épiaison, et constaté une réduction de 20 p. 100 du nombre de grains et de 30 p. 100 de leur poids spécifique. Sous les conditions climatiques de Suède, STOY (1966) constate, par contre, qu'une ablation même partielle des feuilles après l'épiaison réduit le rendement ; mais l'ablation simultanée de quelques épillets rétablit le poids spécifique des grains restants.

Le rôle important joué par la feuille de l'épi (ou *feuille culmaire*) des céréales a été particulièrement mis en évidence : l'influence de ses dimensions a été étudiée tout récemment par BERDAHL (1971) sur deux populations diallèles d'Orge, plante dont les feuilles culmaires sont de petites dimensions par rapport à celles du Blé : malgré une morphologie générale identique par ailleurs, les plantes à feuilles culmaires relativement *grandes* ont toujours un rendement en grain supérieur par épi, au moins quand les conditions de milieu ne sont pas limitantes. Par contre, une meilleure pénétration de la lumière dans les *populations* à petites feuilles aboutit à l'induction d'un *plus grand nombre d'épis* par unité de surface.

CALMES (1966) a montré la différence fondamentale qui existe entre la suppression partielle ou totale de la feuille culmaire de Blé : l'ablation partielle améliore d'une part, la vitesse de migration des glucides, de l'azote, du phosphore... vers l'épi, et rend d'autre part, la tige moins sensible à la verse physiologique. Au contraire, une ablation totale réduit le rendement de 25 p. 100, car les feuilles âgées ne peuvent la compenser.

L'ablation des feuilles pendant la montaison réduit la croissance en hauteur de la tige et son poids de matière sèche, et augmente le rôle des gaines dans la photosynthèse. Mais dans ces conditions, la perte de rendement atteint 32 p. 100 (CALMES, 1966).

Pendant la période de formation du grain, tout le ^{14}C absorbé par la feuille culmaire a migré au bout de 24 heures dans l'épi (CARR et WARDLAW, 1965). Les métabolites quittent rapidement leurs sites de production (KING *et al.*, 1967). Mais ils sont bloqués au niveau du nœud d'insertion de la feuille, avant de pouvoir aller à l'épi. Quand la feuille culmaire devient sénescente, sa contribution cesse rapidement. Les derniers organes chlorophylliens (dernier entre-nœud, glumes et barbes) jouent un rôle prédominant dans la *finition* du grain et influent sur sa qualité (CARR et WARDLAW, 1965). Diverses méthodes ont été utilisées dans l'étude de l'alimentation du grain par l'épi (ablations, ombrages, éléments marqués), et les résultats paraissent parfois divergents au premier examen. Bien qu'ils soient cachés par les glumes, la contribution des *grains* eux-mêmes n'est pas négligeable : EVANS et RAWSON (1970) ont étudié l'évolution des composants de l'épi pendant la phase de *remplissage du grain*. En conditions artificielles (33 000 lux, 21°C), la photosynthèse réalisée par les grains représente le *tiers* de celle de l'épi entier, dans le cas de *Sonora* (Blé barbu) et le *cinquième* pour *Gabo* (Blé non barbu). Les premiers jours suivant la floraison, la photosynthèse du grain lui-même peut représenter jusqu'à 75 p. 100 de celle de l'épi entier. En fin de végétation, la proportion tombe à 26 p. 100 pour *Sonora* et 15 p. 100 pour *Gabo*. Les pertes par *respiration* du $^{14}CO_2$ fixé pendant la journée atteignent dans ces conditions 40 p. 100 de la photosynthèse apparente.

PLANCHON (1971) signale que certains Blés à *épi roux* auraient une meilleure efficience photosynthétique. Ce caractère ne se rencontrant plus en France que sur des cultivars anciens (du genre « rouge de Bordeaux »), des études en ce sens mériteraient d'être reprises.

Le rôle joué par les *barbes de céréales* dans la photosynthèse et l'alimentation de l'épi a été souligné par GRUNDBACHER (1963) et par SYBANENKOV (1966). Leur surface développée peut atteindre le tiers de celle de la feuille culmaire, et leur position (port dressé, et voisinage du grain) les rend particulièrement efficaces. Pour plusieurs Blés et Orges, SAGHIR *et al.* (1968) ont montré que l'ablation des barbes à l'anthèse réduit le rendement de 21 p. 100 et le poids spécifique de 13 p. 100 en moyenne. La *couleur* des barbes a aussi son importance au point de vue photosynthétique : les barbes noires seraient plus efficaces que les blanches (THORNE *et al.*, 1969). Cependant, en travaillant sur des populations en F_2 et F_3, barbues et non barbues homozygotes, MCNEAL *et al.* (1969) ont mis en évidence sur le plan de la qualité la supériorité de lignées non barbues. Ces études seraient à reprendre à partir de matériels génétiques différents avant de conclure.

La *contribution de l'épi* au rendement en grain atteint 57 p. 100 pour des Blés de printemps semés en septembre (en serre), contre 24 et 33 p. 100 respectivement pour des semis de janvier et février (BUTTROSE et MAY, 1965), ce qui peut expliquer les résultats assez variables obtenus en conditions variées par les auteurs.

B. — *Relations entre les différents éléments de la plante*

Les relations existant entre le volume de stockage de l'épi et la surface photosynthétisante ont été mis en évidence sur Blé de printemps par HSU et WALTON (1971) et par STOY (1966), et par KRZYWACKA (1971) sur Blés d'hiver. Une corrélation ($r = 0{,}93$) a été proposée au Canada pour 120 cv. de Blés par SIMPSON (1968) :

$$Y = -0{,}363 + 0{,}015\,X$$

avec : Y = grammes de grain par plante ; X = surface photosynthétisante au-dessus du dernier entre-nœud, en cm^2.

EVANS et RAWSON (1970) ont montré que la photosynthèse de la feuille culmaire dépend de la demande de l'épi : l'épi accumule environ 130 mg de CO_2 par jour, mais perd par respiration 43 mg par nuit. L'alimentation de l'épi est assurée par la photosynthèse nette de l'épi lui-même (50 mg), de la feuille culmaire (125 mg) et de la tige (42 mg). On peut en conclure que la production photosynthétique de l'épi et de la feuille culmaire peuvent à eux seuls assurer l'alimentation nette du grain.

En ce qui concerne les sources, LUPTON (1969) arrive à une répartition un peu différente : 65 p. 100 du rendement proviendrait de la feuille de l'épi, 25 p. 100 de la deuxième feuille, et 10 p. 100 de l'épi lui-même, la tige et les feuilles inférieures n'étant pas envisagées par cet auteur. TEARE et PETERSON (1971) trouvent quant à eux que le rendement photosynthétique des épis des Blés barbus peut atteindre 80 p. 100 du rendement de la feuille de l'épi et 38 p. 100 seulement pour des Blés non barbus, à surfaces chlorophylliennes égales. THORNE (1965) a souligné l'importance des phénomènes respiratoires au niveau de l'épi : la respiration à l'obscurité peut consommer

25 p. 100 des produits formés, dans le cas du Blé, et jusqu'à 50 p. 100 dans le cas d'Orges. Mais ces relations ne sont exactes qu'aux températures des essais (voisines de l'optimum).

L'essentiel de l'alimentation du grain est assurée par la photosynthèse courante de la plante pendant cette phase, et non par des réserves préexistantes. On constate qu'il y a en fait remplacement des réserves dans la tige, les produits nouveaux prenant la place de produits antérieurement formés, et la quantité de matières de réserves reste stable ou même croît légèrement pendant cette phase (RAWSON et EVANS, 1971). Ces auteurs montrent que les *rendements* en grain élevés sont associés à une vitesse rapide de remplissage du grain pendant les premiers jours suivant la floraison. Ceci est à rapprocher des travaux de GESLIN et JONARD (1948), qui avaient montré l'importance de la phase de « palier » de teneur en eau du grain, beaucoup plus tardive.

STOY (1966) a observé que le volume des organes de stockage des Blés cultivés a décuplé par rapport à celui des Blés sauvages, alors que leur surface photosynthétisante n'a que triplé. Une bonne partie des progrès doit être due à l'efficience améliorée des migrations. Mais l'explicitation du potentiel de rendement est très précoce ; elle dépend des conditions climatiques au moment de la *différenciation* des cellules mères des épillets. La suppression de l'épi réduit la production de la feuille culmaire de 50 p. 100 en 3 à 15 heures. Elle réduit les migrations, du fait qu'il n'y a plus de zone de stockage (LUPTON et ALI, 1966). Si on *ombrage* le reste de la plante, la photosynthèse de la feuille culmaire se rétablit, et des produits migrent de façon basipète, vers la tige et les racines (KING *et al.*, 1967). L'ombrage de l'épi lui-même réduit considérablement le rendement en grain (SAGHIR *et al.*, 1968). L'*inhibition* de la photosynthèse de l'épi à l'aide de DCMU provoque une reprise de l'activité de la feuille culmaire sénescente, et augmente le pourcentage des migrations vers l'épi, en valeur relative.

Ces expériences permettent d'affirmer que l'épi gouverne *directement* le fonctionnement de la feuille culmaire, sans qu'on ait à envisager l'action d'auxines produites par les organes de réserve (KING *et al.*, 1967).

C. — *Action du milieu*

Quant un *déficit hydrique durable* apparaît dans la plante, on constate parfois une augmentation de la teneur en sucres du dernier entre-nœud accompagné d'un ralentissement des processus de migration depuis les sites de photosynthèse (WARDLAW, 1967). Si ce déficit se produit dix jours avant la floraison l'effet sur le rendement est maximal, et se traduit surtout par une réduction de la fertilité des épillets (FISHER, 1970). Si ce déficit arrive après la floraison, on observe un jaunissement des feuilles et des tiges ; et s'il se prolonge pendant 28 jours, il réduit le nombre de grains et leur poids spécifique. La disparition de la chlorophylle est plus ou moins rapide selon les cultivars, et s'accompagne de variations notables de la qualité du grain (ASANA *et al.*, 1958 ; ASANA et SAINI, 1958). Une corrélation étroite à ce sujet a été trouvée par BOYD et WALKER (1972) pour 19 cv. de Blés.

La *teneur en eau* des épis est peu modifiée quand on applique une sécheresse édaphique pendant la phase de grossissement du grain, mais le nombre d'épis est réduit. Les travaux de ASANA et SAINI (1958, 1962) suggèrent que de faibles diffé-

rences de teneur en eau des différentes fleurs de l'épillet à la floraison peuvent induire une coulure qui se manifeste ultérieurement. La diminution du poids sec de chaque grain (ou échaudage) apparaît assez tardivement, malgré des déficits hydriques importants, même si des températures élevées règnent pendant leur grossissement. Mais on constate des différences importantes entre cultivars (ASANA et SAINI, 1962).

A basses températures, on observe une accumulation des produits de la photosynthèse au voisinage des sites de production (TRUNOVA, 1970). MALOFEEV (1971) a montré l'importance de cet effet pendant la phase d'endurcissement des Blés d'hiver. Des températures plus basses au niveau des racines qu'à celui des tiges améliorent l'alimentation de ces dernières (WARDLAW, 1968). Par contre, une modification artificielle de la température d'une partie seulement des organes aériens ne paraît pas modifier les migrations.

Des *températures élevées* au stade du grain laiteux, supérieures à 30 °C, accélèrent la vitesse de migration de la tige vers l'épi, le jaunissement de l'épi, et l'accumulation de l'amidon dans les grains (ASANA et SAINI, 1962). Mais des températures modérées (20°C) permettent à la plante de mieux supporter la sécheresse, et à cet égard, des différences importantes existent entre cultivars : LYAPSHINA (1967) et PLANCHON (1971) ont mis en évidence des optimums thermiques très variables pour la photosynthèse de différents cultivars, entre 15 et 25°C au moins.

NEALES *et al.* (1963) ont mis en évidence une *alimentation azotée* accrue du *grain* si, après la floraison, une carence apparaît au niveau des *racines*. L'ablation des feuilles à l'anthèse a un effet inverse, et l'*ombrage* de l'épi réduit sa teneur en acides aminés, mais élève sa teneur en nitrates. Une fertilisation azotée correcte diminue les pertes respiratoires pendant la phase de remplissage du grain (DOROKHOV et BARANINA, 1969). Mais la réponse à la fertilisation azotée tardive paraît dépendre beaucoup du génotype (JOLIVET, 1956).

Les autres éléments minéraux sont indispensables aussi pendant la croissance du grain : le potassium est d'autant mieux utilisé que le rayonnement solaire est « optimum » (KOPECKY, 1970), et l'association azote-phosphore présente des actions synergiques (ANISIMOV, 1966).

Le rendement en grain est aussi fonction de la pénétration de la lumière dans le couvert, et de l'intensité et de la durée de vie des feuilles après la floraison (BALDY, 1973 *b*). Ces facteurs dépendent eux-mêmes de la température moyenne régnant pendant cette période.

En conditions dites « optimales » (?), WELBANK (1968) et CAMPBELL *et al.* (1969) arrivent à une régression linéaire entre le rayonnement global pendant la phase de grossissement du grain et le rendement final : $r = 0{,}81$ dans ces conditions. En tenant compte en outre de la température, ils arrivent à $r = 0{,}88$. BERDAHL (1971) obtient un coefficient de régression de 0,89 en tenant compte de l'absorption du gaz carbonique et du rendement en grain (en conditions naturelles), mais observe que l'énergie lumineuse n'est jamais saturante dans ses peuplements. Ses mesures de rayonnement ne tiennent pas compte du rapport variable visible/infrarouge dans le peuplement, alors que nous en avons vu l'importance précédemment.

Le rapport des énergies dans le bleu et le rouge est important lui aussi dans la définition du rendement : FOLTYN (1969) a mis en évidence des déformations de l'épi, mais une augmentation du rendement en grain en enrichissant en bleu le spectre, et une réduction du rendement si la lumière est artificiellement enrichie en rouge

(FRIEND, 1966 ; FOLTYN, 1969 ; GMELIG-MEYLING, 1967).

Le phénomène semble assez général chez les graminées : MCBEE (1969) arrive au même résultat sur *Cynodon dactylon* L.

D. — *Effet des maladies sur les migrations chez les céréales*

Des maladies cryptogamiques comme les rouilles modifient le métabolisme et réduisent à la fois la photosynthèse et les migrations : le flux de sève élaborée dépend de l'état des organes *récepteurs* (WARDLAW, 1968).

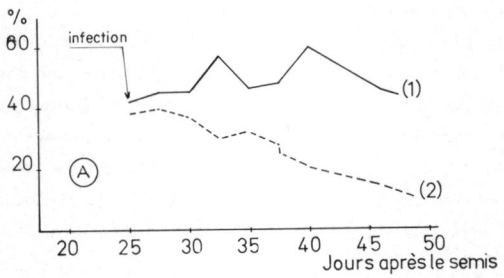


FIG. 24 A. — *Pourcentage d'absorption de* $^{14}CO_2$ *par la deuxième feuille du Blé* Jufy 1, *pour des plantes saines* (1) *et malades* (2) *en fonction de leur âge*
(d'après SIDDIQI et MANNERS, 1971)

SIDDIQI et MANNERS (1971) ont étudié l'effet d'attaques de rouille jaune aux différents stades de la croissance du Blé, et à plusieurs intensités d'infestation. Une attaque généralisée et précoce peut réduire la surface photosynthétisante de 30 p. 100 sans que la masse surfacique des feuilles varie beaucoup. La production de matière sèche des parties aériennes peut être réduite de 50 p. 100, et celle des racines de 70 p. 100. Les attaques tardives sont beaucoup moins importantes, particulièrement si une seule feuille par tige est attaquée, ou si l'infection porte sur les feuilles de la base et les talles tardives. Le rendement en grain est alors peu modifié (SIDDIQI et MANNERS, 1971). Ces effets sont à rapprocher des conditions climatiques règnant sous

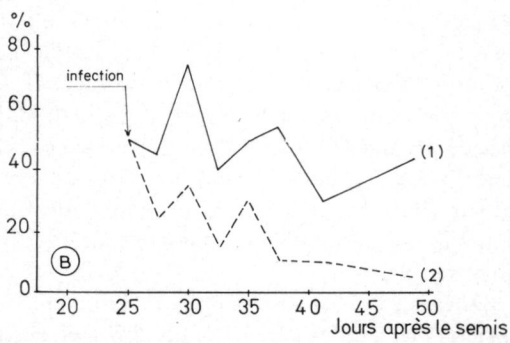


FIG. 24 B. — *Pourcentage des migrations de la feuille saine* (1) *et de la feuille malade* (2), *en fonction de son âge* (d'après SIDDIQI et MANNERS, 1971)

N. B. L'attaque a été provoquée au moment où commencent les courbes.

le couvert, et en particulier de la persistance de la rosée sur certains organes (BURRAGE, 1969 ; DEAN, 1969 ; HALLAIRE, RAPILLY et PAUVERT, 1969).

Les figures 24 A et B, tracées d'après SIDDIDI et MANNERS (*loc. cit.*) montrent respectivement les variations de la fixation du CO_2 sur la deuxième feuille de Blé en fonction du temps, à partir d'infections artificielles, et la réduction progressive des migrations : l'assimilation nette est fortement réduite par l'attaque du champignon. LAST (1963) montrait qu'*Erisiphe graminis* MÉRAT agit exactement comme *Puccinia striiformis* HOST.

Les expériences récentes de NATR (1971) montrent un effet néfaste sur la photosynthèse de l'Orge de la fusicoccine, et KULAEVA et KLYACHKO (1967) soulignent l'importance des effets télétoxiques d'excrétats fongiques (puromycine en l'occurrence) sur les synthèses des protéines dans la feuille.

Des attaques de pucerons peuvent avoir un effet analogue (KOLBE, 1970). Ils réduisent le rendement et la qualité non seulement en consommant le contenu des cellules, mais aussi en bloquant, par injection de produits toxiques, la photosynthèse ultérieure des parties indemnes. Nous avons constaté nous-mêmes, sur Blés de printemps, que la photosynthèse apparente était réduite ou nulle, quelques jours après l'apparition des pucerons sur les feuilles, même dans les parties non attaquées (BALDY, 1973 *b*). Ceci paraît agir assez notablement sur le rendement final.

CONCLUSIONS

Des progrès considérables ont été faits depuis une dizaine d'années en ce qui concerne la répartition et l'efficacité de la lumière, et les processus de photosynthèse, dans les peuplements de graminées, et de Blé en particulier. Il faut remarquer cependant que ces résultats récents n'ont souvent fait que confirmer et expliquer des travaux plus anciens.

De nombreux chercheurs, d'origine géographique très diverse, travaillent sur Blé. Les relations existant, en particulier, entre la croissance, le développement du grain, la température, la lumière et la photosynthèse sont étudiées actuellement sous divers angles. Si des travaux intéressants portent sur les relations mutuelles existant entre *plantes* de Blé dans un peuplement, on constate, par contre, qu'on a peu d'informations sur l'activité propre de chaque *organe* de la plante au sein du peuplement, pas plus que sur l'évolution de cet organe, en conditions naturelles, en fonction de son vieillissement et de sa situation à chaque instant au sein du peuplement.

On manque encore de données sur la *répartition spectrale* de la lumière dans la végétation, pour chaque organe et chaque type de temps. Il paraît probable que la structure des pigments photosensibles évolue au cours de la vie de chaque feuille. La hauteur du soleil sur l'horizon, la température, l'alimentation en eau, l'état sanitaire et la disposition spatiale du feuillage... peuvent affecter aussi l'activité photosynthétique de chaque feuille.

Si de grands progrès ont été accomplis dans le domaine des *migrations* des produits de la photosynthèse des feuilles vers les organes de réserve (et on ne saurait trop souligner à cet égard l'importance des travaux de WARDLAW et de son équipe), on manque encore de données sur l'*évolution* des produits bruts de la photosynthèse au

cours de leur migration vers l'épi, et de leur transformation qualitative en produits élaborés (protéines...). La *causalité* des phénomènes, et en particulier les relations génétiques et l'action des facteurs physiques qui coopèrent au potentiel de production de chaque plante dans l'ensemble cultivé, sont encore à trouver pour la plupart, tant pour les Blés durs que pour les Blés tendres.

Le bilan des connaissances actuelles est cependant très *positif:* on a ainsi pu mettre en évidence la faiblesse du *rayonnement photosynthétiquement actif* résiduel à la base de la végétation, et la proportionnalité *à l'échelle de la journée* de la photosynthèse apparente et du rayonnement visible, tel qu'on peut le mesurer avec des pyranomètres munis de filtres.

L'importance de l'origine *génétique* et *géographique* des blés a été démontrée, et en particulier son action sur les réactions à la *photopériode*, à la température et à la sécheresse, comme aussi sur la durée de vie des feuilles. Ce dernier facteur est très important après la floraison, comme aussi la réaction de l'épi aux températures extrêmes. Des analyses dynamiques de la photosynthèse des feuilles, de leur apparition à leur mort, sont actuellement entreprises avec succès.

Les caractères particuliers de la *photosynthèse de l'épi* et son rôle original dans l'alimentation du grain ne font plus de doute maintenant. Si on connaît mal les mécanismes commandant l'action de l'épi sur l'activité photosynthétique du reste de la plante (et de la feuille culmaire en particulier), on a pu montrer l'importance de son rôle dans le contrôle des migrations des feuilles vers l'épi, et son importance en tant que *réservoir*. Des études biochimiques et macro-physiologiques menées en équipe et en conditions naturelles, pourraient apporter rapidement une réponse à ce problème, compte tenu des éléments actuellement disponibles.

La durée de vie active de l'épi peut se traduire par le nombre de jours durant lequel il reste vert après la floraison, et la *qualité* du grain paraît étroitement liée à ce facteur, qui est soumis lui-même à des caractères génétiques de résistance à la sécheresse et à la chaleur pendant cette phase de la maturation.

L'étude systématique de la structure fine des *organes de transfert* des assimilats, des feuilles vers les épis (via les tiges), et le rôle exact des gaines foliaires est encore à poursuivre. Les informations à ce sujet sont peu nombreuses, confuses, alors qu'il pourrait s'agir d'un phénomène important : l'importance des polymérisations successives qui se produisent lors du transfert des produits de la feuille à l'épi est assez mal connue ; on sait que les produits se substituent et se transforment plusieurs fois durant ce parcours. La *vitesse* de transfert paraît liée à la température, mais les variations considérables observées d'une variété à une autre font penser que ce facteur n'est pas seul en cause. L'évolution des produits durant leur transfert paraît jouer un rôle important dans les processus de maturation *qualitative* du grain.

On commence à se faire une idée assez précise de l'alimentation de chaque organe par les autres, et sur les relations existant entre les racines et les parties aériennes : l'action différente sur la photosynthèse et les migrations de l'ablation partielle d'un organe, ou de son ablation totale, est à souligner. Des ablations partielles précoces ont peu ou pas d'effet sur la production de matière sèche totale de grain, mais les *produits* accumulés dans celui-ci peuvent être différents.

Cette observation est à mettre en liaison avec l'effet d'attaques parasitaires, qui agissent non seulement au niveau de l'organe touché, mais aussi (et surtout parfois) sur les zones apparemment saines de l'organisme. Ces constations incitent à envi-

sager *globalement* la protection des plantes, et à rechercher la prévention, plutôt que la curation. Il serait particulièrement intéressant d'avoir plus d'information sur la sensibilité aux maladies des feuilles qui se développent à l'ombre des talles dominantes pendant la montaison, et sur leur intérêt réel pour le rendement final. Il semble cependant que la réaction soit assez variée selon les cultivars, et que ce problème se pose plus nettement pour les blés de printemps (à montaison rapide) que pour les Blés d'hiver (dont la plupart des feuilles sont initiées pendant la phase prostrée).

Les connaissances relatives à l'origine génétique et aux conditions climatiques antérieures, permettent d'expliquer certaines différences constatées entre cultivars, et on pourrait envisager d'introduire ces critères dans des programmes d'amélioration. C'est ainsi que les variations considérables de la photorespiration et de la respiration à l'obscurité d'un cultivar à un autre sont liées à la notion de Q_{10} de la température (diurne ou nocturne) : une faible respiration nocturne à température élevée peut augmenter considérablement la photosynthèse nette. La masse surfacique, la surface des feuilles, et la durée de vie de celles-ci sont étroitement liées au potentiel de rendement de la variété, mais beaucoup moins au type de produits élaborés.

On sait que les cultivars qui ont la meilleure productivité moyenne présentent généralement une faible variation de leur photosynthèse *apparente* avec la température. Par contre, l'intérêt des *barbes* est très discuté, sans que les expériences réalisées permettent de conclure à leur inutilité.

La surface foliaire totale (par unité de surface de sol) de peuplements de Blé semés à densité normale paraît généralement *surabondante* au moment de l'épiaison sous le climat de Versailles. Cette surface se réduit très rapidement après la floraison par disparition des feuilles de la base des tiges et par mort des talles tardifs non épiés. Nous avons ainsi pu constater à Versailles qu'on passe d'un LAI de 8 à un LAI de 4 (en surfaces vertes des feuilles, tiges et épis), de l'épiaison à dix jours après la floraison, pour la plupart des cultivars étudiés.

Il semble intéressant de réduire autant que possible la *masse sèche* accumulée *avant* la floraison, et en particulier des talles herbacés improductifs, dans le cas des céréales cultivées pour le *grain*, car la quasi-totalité des produits accumulés dans l'épi proviennent de la photosynthèse postérieure à la floraison. L'idéal pourrait être de tendre à obtenir un petit nombre de talles productifs (deux ou trois), d'âge physiologique aussi peu différent que possible, et possédant un grand nombre de faisceaux conducteurs et des cellules du parenchyme en anneau autour de ces derniers : il semble que ces caractères facilitent des migrations rapides vers l'épi, ce qui doit se compléter par une augmentation des réservoirs de transit (gaines, tiges) des produits assimilés.

Beaucoup d'efforts sont faits actuellement pour améliorer les différents critères de qualité des Blés, en fonction du but recherché. Il semble qu'une attention particulière doit être apportée à la réaction de la plante à des conditions adverses au moment de l'*initiation* des organes, et aussi aux effets des infections parasitaires sur le reste de la plante : ainsi la punaise des céréales agit plus par les toxines qu'elle injecte que par sa consommation réelle de produits dans le grain. On sait dans ce cas que la lutte doit impérativement être menée *préventivement*. Mais il semble bien qu'il en va de même pour les *rouilles*, et beaucoup d'autres maladies ou parasites. Ceci se traduit dans la pratique par des programmes très encourageants de développement

de gènes de *résistance*, et aussi par des pratiques culturales adaptées, qui permettent d'éviter l'apparition de tel ou tel parasite.

L'analyse de la photosynthèse du Blé ne peut être envisagée comme une fin en soi : entre la production primaire au niveau du chloroplaste et le grain, une longue chaîne très mal connue de réactions prend place, et devra être élucidée le plus rapidement possible si on souhaite faire des progrès *conscients* dans le domaine de la productivité et de la qualité des produits finaux. Il faut aussi souligner que ce type d'étude permettra d'aboutir à des blés *différenciés*, beaucoup plus qu'actuellement, en fonction du but recherché : teneur en protéines, fourrage à haute digestibilité, farine... L'état des découvertes mondiales actuelles rend très optimiste quant à l'avenir.

Reçu pour publication en août 1972.

SUMMARY

ON ACTIVE PHOTOSYNTHETIC ENERGY. ITS USE BY GRAMINATES DURING THEIR GROWTH SPECIAL CASE OF WHEAT

This study is based on personal results supported and substantially completed by a wide bibliographic analysis, one fourth of which, at the most, is shown here. The first part shows the effect of light energy on wheat cultivation, versus the weather and other climatic conditions as well as the dynamic range of the population growth.

The study then shows the evolution of photosynthesis versus the ontogenesis of wheat, of the growth of its developed leave surface and the characteristics of the latter. The present knowledge of the processus related to photosynthesis (in the case of wheat) and their modifications (artificial conditions permitting more thorough understanding of certain phenomena) is briefly reviewed. Then, the evolution of the photosynthesis in the leaves, the plant and the population during their life is considered as well as the nutritious relations existing between the organs. In particular, the differences found in the apparent photosynthesis with the genotypes and the climatic conditions and their relations with the yield are dealt with. The effect of parasitic attack on photosynthesis is outlined and by way of conclusion, an attempt is made to suggest means likely to lead to qualitative and quantitative improvements in wheat productivity.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBER DIE AKTIVIERTE ENERGIE IN DER FOTOSYNTHESE UND ÜBER IHRE ANWENDUNG DURCH DIE GRAMINEEN IM LAUFE IHRER ENTWICKLUNG SONDERFALL EINER WEIZEN-PFLANZEN-BEVÖLKERUNG

Diese Untersuchung fusst auf persönlich vom Autor gesammelte Daten, welche von einer analytischen Untersuchung der zuständigen Litteratur, von der nur ein knappes Viertel im Litteraturverzeichnis angeführt ist, gestützt und wesentlich vervollständigt wurde. Im *ersten Teil* wird der Einfluss der *Licht-energie* auf die Weizenkultur, in Abhängigkeit des Wetters und der sonstigen Klimaeinflüsse sowie die Wachstumsdynamik der Weizenpflanzen-*Bevölkerung* untersucht.

Dann wird die *Evolution der Fotosynthese* in Abhängigkeit der Ontogenie des Weizens der Wachstums seiner entwickelten Blattfläche und der Kenndaten dieser Fläche untersucht. Des Stand unserer Kenntnisse über die mit der Fotosynthese in Beziehung stehenden Vorgänge wird (im Falle des Weizens) kurz zusammengefasst, sowie die Änderungen dieser Vorgänge (wobei es durch künstliche Bedingungen möglich ist einen besseren Einblick auf den Ursprung gewisser Vorgänge zu erzielen). Dann wird die *Evolution* der Fotosynthese des *Blattes*, der *Pflanze* und der *Bevölkerung* im Laufe ihres Lebens betrachtet sowie die Ernährungsbeziehungen zwischen den einzelnen Organe. Man untersucht ganz besonders die Differenzen, die man in der scheinbaren Fotosynthese in Abhängigkeit des *Genotyps* und der Klimabedingungen beobachtet, sowie ihre Beziehung zur Ausbeute. Dann wird der Einfluss der Schädlingsangriffe auf die Fotosynthese untersucht und zum Schluss wird versucht Wege vorzuschlagen, welche zu *qualitativen* und quantitativen Fortschritten in der Produktivität des Weizens führen könnten.

РЕЗЮМЕ

Об активной энергии фотосинтеза и ее использовании злаковыми в течении их развития.

К. БАЛЬДИ.

Данная работа основана на результатах полученных автором, подкрепленных и дополненных *анализом обширных библиографических данных*, из которых едва-ли четверть получила применение. В *первой части* выявляется влияние световой *энергии* на культуру пшеницы, в зависимости от погоды и прочих элементов климата, и динамики роста *популяции*.

Затем рассматривается *эволюция фотосинтеза*, в зависимости от онтогенеза пшеницы, увеличения ее развивающейся листовой площади и характера листвы. Вкратце напоминается состояние наших знаний о процессах связанных с фотосинтезом (в случае пшеницы), и об их изменениях (искуственные условия позволяют лучше понять происхождение некоторых явлений). Следует изучение *эволюции фотосинтеза листьев*, *целого растения* и *популяции* в течении всей их жизни и *питательные отношения* существующие между разными органами растения. И, в частности, подчеркиваются различия отмеченные в отношении видимого фотосинтеза, в зависимости от *генотипов* и *климатических условий*, и их связь с *урожайностью*. И, наконец, затрагивается вопрос влияния атак паразитов на фотосинтез и предлагаются пути для достижения *качественных* и количественных улучшений продуктивности пшеницы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDELIC M. *et al.*, 1970. Number and size of stomata in different Wheat genotypes. *Contemp. agric.*, **18**, 10, 55-58.

ANISIMOV A. A., 1966. On the mechanism of the action of phosphorus on translocation of carbohydrates. *Sov. Pl. Physiol.*, **13**, 1, 70-75.

ASADA K. *et al.*, 1960. Translocation of photosynthetic products assimilated by the top leaf to the ear of Rice and Wheat plants. *Mem. Res. Inst. Food Sci. Kyoto Univ.*, **22**, 1-11.

ASANA R. D., MANI V. S., 1950. Studies in physiological analysis of yield. I. Varietal differences in photosynthesis in the leaf, stem and ear of Wheat. *Physiol. Plant*, **3**, 22-39.

ASANA R. D., MANI V. S., 1955. Studies in physiological analysis of yield. II. Further observations on varietal differences in photosynthesis in the leaf, stem and ear of Weath. *Physiol. plant.*, **8**, 8-19.

ASANA R. D. *et al.*, 1958. Studies in physiological analysis of yield. III. The rate of grain development in Wheat, in relation to photosynthetic surface and soil moisture. *Physiol. plant.*, II, 655-665.

ASANA R. D., SAINI A. D., 1958. IV. The influence of soil drought on grain development, photosynthetic surface and water content of Wheat. *Physiol. Plant.*, **11**, 666-674.

ASANA R. D., SAINI A. D., 1962. V. Grain development in Wheat in relation to temperature, soil moisture and changes with age in the sugar content of the stem and in the photosynthetic area. *Indian J. Plant. Physiol.*, **5**, 128-171.

AURIAU Ph., 1964. *Étude comparée du développement reproductif de quatre variétés de Blés durs* (*Triticum durum* DESF.) Thèse Doct. État Fac. Sci Paris, 155 pp.

AZZI G., 1927. *Le climat du Blé dans le monde.* Institut Intern. Agric. Rome, 1161 pp.

BALDY Ch., LE BUHAN J. P., 1971. Répartition de la photosynthèse nette dans les feuilles de tabac. *Photosynthetica*, **5**, 421-423.

BALDY Ch., LE BUHAN J. P., 1972. Utilisation d'une chambre d'illumination dans les études de photosynthèse apparente par gravimétrie. *Physiol. végét.*, **10**, 171-180.

BALDY Ch., 1971. Analyse de la photosynthèse du Maïs par une méthode gravimétrique dans les conditions naturelles. *Œcol. Plant.*, **6**, 101-114.

BALDY Ch., 1973 *a*. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du Blé (sous presse). *Ann. agron.*, **24**, (2).

BALDY Ch., 1973 *b*. *Croissance, photosynthèse et répartition de la lumière dans des peuplements de Blé tendre. Contribution à l'étude des relations mutuelles dans des peuplements purs et des associations ligne à ligne de cultivars.* Thèse de Docteur. - Ing. en cours de rédaction : Univ. Paris-Sud.

BARRS H. D., 1971. Cyclic variations in stomatal aperture, transpiration and leaf water potential under constant environmental conditions. *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, **22**, 223-236.

BARTA A. L., HODGES H. F., 1970. Characterization of photosynthesis in cold hardening winter Wheat. *Crop Sci.*, **10**, 535-538.

BERDAHL J. D., 1971. *The effect of leaf area on grain yield, photosynthesis, and light penetration in Barley.* Diss .Abstr. intern. (B) 31 : 5757-5758. Ph. D. Thesis, Univ. Minnesota, 1970, 47 pp.

BIRECKA H. *et al.*, 1968. Ear contribution to photosynthetic activity in winter cereals. I. Winter wheat. *Bull. Acad. Pol. Sci.*, Sér. Sci. Biol., **16**, 191-196.

BLACK C. C., 1971. Ecological implications of dividing plants into groups with distinct photosynthetic production capacities. In *Adv. in Ecological research*, **7**, 87-114. J. B. Cragg Ed. Acad. Press., London.

BONHOMME R., 1969. Contribution à l'étude de la composition spectrale des rayonnements d'origine solaire à l'air libre et sous une serre. *Ann. agron.*, **20**, 183-200.

BONHOMME R., VARLET-GRANCHER Cl., 1970. Comparaison d'un spectrophotomètre à dispositif optique et d'un spectroradiomètre. Composition spectrale du rayonnement global et diffus. In *Techniques d'étude des facteurs physiques de la Biosphère*, I. N. R. A. éd., pp. 89-98.

BORTHWICK H. A. *et al.*, 1969. The high-energy light action controlling plant responses and development. *Proc. nation. Acad. Sci. U. S. A.*, **64**, 479-486.

BOYD W. J. R., WALKER M. G., 1972. Variation in chlorophyll *a* content and stability in Wheat flag leaves. *Ann. Bot.*, **36**, 82-92.

BREMMER P. M., 1969. Growth and yield of three varieties of Wheat, with particular reference to the influence of unproductive tillers. *J. agric. Sci. Camb.*, **72**, 281-287.

BRENNAN B., BANDEEN W. R., 1970. Anisotropic reflectance characteristics of natural earth surfaces. *Appl. Optics*, **9**, 405-412.

BROWN K. W. *et al.*, 1970. Shading inverted pyranometers and measurements of radiation reflected from an Alfalfa crop. *Water Ressources Res.*, **6**, 1782-1786.

BULLEY N. R., 1970. *Effects of light quality and intensity on photosynthesis and photorespiration in attached leaves.* Diss. Abstr. Intern. (B) 30 : 5383 (abstract).

BULLEY N. R., TREGUNNA E. B., 1970. Photosynthesis and photorespiration rates at the CO_2 compensation point. *Canad. J. Bot.*, **48**, 1271-1276.

BUNTING A. H., DRENNAN D. S. H., 1966. Some aspects of the morphology and physiology of cereals in the vegetation phase. In *The growth of cereals and grasses*, Milthorpe et Ivins Ed. Butterworths.

BURRAGE S. W., 1969. Dew and growth of the uredospore germ tube of *Puccinia graminis* on the Wheat leaf. *Ann. Appl. Biol.*, **64**, 495-503.

BUTTROSE M. S., MAY L. H., 1965. Seasonal variation in estimates of cereal-ear photosynthesis. *Ann. Bot.*, **29**, 79-81.

CALMES J., 1966. Effets de l'amputation totale ou partielle des limbes chez le Blé. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **56**, 106-112.

CAMPBELL C. A. *et al.*, 1969. Influence of solar radiation and soil moisture on growth and yield of Chinook Wheat. *Canad. J. Plant. Sci.*, **49**, 685-699.

CARR D. J., WARDLAW I. F., 1965. The supply of photosynthetic assimilates to grain from flag leaf and ear of Wheat. *Austr. J. Biol. Sci.*, **18**, 711-719.

CHARLES-EDWARDS D. A. *et al.*, 1971. The influence of temperature on photosynthesis and transpiration in ten temperate grass varieties grown in four different environments. *J. exper. Bot.*, **22**, 650-662.

CHARTIER Ph., 1970. *Assimilation nette d'une culture couvrante.* I. Détermination de l'assimilation nette de la culture à partir d'une analyse théorique. II. La réponse de l'unité de surface de feuille. *Ann. Physiol. vég.*, **11**, 123-159 et 221-263, 1969.(Thèse Doctorat d'État, Université de Paris-Sud, 1970).

CHONAN N., 1965. Studies on the photosynthetic tissues in the leaves of cereal crops. I. The mesophyll structure of Wheat leaves at different levels of the shoot. *Tohoku J. agric. Res.*, **16**, 1-12.

CHONAN N., 1966. II. Effects of shading on the mesophyll structure of the Wheat leaves (J. an). *Proc. Crop Sci. Jap.*, **35**, 78-82.

COMBRES J. Cl. *et al.*, 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à la mesure du rayonnement sous couvert végétal. In : *Techniques d'Étude des facteurs physiques de la biosphère*, I. N. R. A. éd., pp. 59-71.

CRISWELL J. G., 1971. *Physiological basis for variation of net photosynthesis in Oat* (*Avena* spp.) *leaves as affected by genotypes and sink-source ratios.* Diss. Abstr. intern. (B) 31 : 5116 (abstract).

CRISWELL J. G., SHIBLES R. M., 1971. Physiological basis for genotypic variation in net photosynthesis of Oat leaves. *Crop Sci.*, **11**, 550-553.

CRUIZIAT P., 1972. *Contribution à l'étude des réserves en eau de la plante.* Thèse Doctorat en Biophysique. Université de Paris VI.

CURRY G. M., 1969. Phototropism. In *The physiology of plant growth and development.* M. B. Wilkins ed. Mc Graw-Hill London, p. 243-273.

DAVIDON J. L., 1965. Some effects of leaf area control on the yield of Wheat. *Austr. J. agric. Res.*, **16**, 721-731.

DEAN W. M., 1969. The effect of temperature and loose smut on Wheat (*Ustilago nuda*). *Ann. appl. Bot.*, **64**, 75-85.

DJAVANCHIR A., 1971. *Mise au point d'une chambre de transpiration et son application à l'étude de la régulation stomatique.* Thèse Docteur-ingénieur. Université de Paris-Sud. Ronéotypée.

DOODSON J. K. *et al.*, 1964. The distribution pattern of 14 carbon assimilated by the third leaf of Wheat. *J. Exper. Bot.*, **15**, 96-103.

DOROFEEV V. F., GRADCHANINOVA O. D., 1971. Anatomical studies in the stem and leaf of Wheat (russe). *Trudy prikl. Bot. Genet. Selek.*, **44**, 57-74.

DOROKHOV B. L., BARANINA I. I., 1969. Intensité de la photosynthèse de l'épi et de la partie supérieure de la tige de Blé. (en russe). In *Méthodes d'accroissement de l'intensité et du rendement de la photosynthèse* Kiev, T. 3, 96-101.

DOWNES R. W., 1970. Effect of light intensity and leaf temperature on photosynthesis and transpiration in Wheat and Sorghum. *Austral. J. biol. Sci.*, **23**, 775-782.

DOWNTON W. J. S., 1970. *Some interrelations of photosynthesis and photorespiration among species.* Diss. Abstr. internat. (B.), **31**, 79 (abstract).

DOWNTON W. J. S., TREGUNNA E. B., 1968. Carbon dioxide compensation, its relations to photosynthetic carboxylation reactions, systematics of the Gramineae and leaf anatomy. *Canad. J. Bot.*, **46**, 207-215.

DUNCAN W. G. *et al.*, 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia*, **38**, 181-205.

DUNCAN W. G., 1971. Leaf angles, leaf area and canopy photosynthesis. *Crop. Sci.*, **11**, 482-485.

DVORAK J., NATR L., 1971. Carbon dioxide compensation points of *Triticum* and *Aegilops species. Photosynthetica*, **5**, 1-5.

EVANS L. T., 1970. The effect of light on plant growth, development and yield. In Coll. Unesco Uppsala. *Réponse des plantes aux facteurs du climat*, 40 p.

EVANS L. T., DUNSTONE R. L., 1970. Some physiological aspects of evolution in Wheat. *Austral. J. biol. Sci.*, **23**, 725-741.

EVANS L. T. *et al.*, 1970. The phloem of the Wheat stem in relation to requirements for assimilates by the ear. *Austral. J. biol. Sci.*, **23**, 743-752.

EVANS L. T., RAWSON H. M., 1970. Photosynthesis and respiration by the flag leaf and components of the ear during grain development in Wheat. *Austral. J. biol. Sci.*, **23**, 245-254.

FERRON F., 1971. Observation de la régulation stomatique dans la feuille de Blé par une méthode isotopique. *Physiol. végét.*, **9**, 281-301.

FISCHER R. A., 1970. The effect of water stress at various stages of development on yield processes in Wheat. In Coll. Unesco Uppsala. *Réponse pl. fact. climat*, 25 p.

FISCHER R. A., KOHN G. D., 1966 *a*. The relationship between evapotranspiration and growth in the Wheat crop. *Austral. J. agric. Res.*, **17**, 255-267.

FISCHER R. A., KOHN G. D., 1966 *b*. Soil water relations and relative turgidity of leaves in the Wheat crop. *Austral. J. agric. Res.*, **17**, 269-280.

FISCHER R. A., KOHN G. D., 1966 *c*. The relationship of grain yield to vegetative growth and post-flowering leaf area in the Wheat crop under conditions of limited soil moisture. *Austral. J. agric. Res.*, **17**, 281-295.

FOCK H.,KROTKOV G., 1969. Relation between photorespiration and glycolate oxidase activity in Sunflower and *Red kidney* Bean leaves. *Canad. J. Bot.*, **47**, 237-240.

FOLTYN J., 1966. The influence of the light spectrum on the development and productivity of the ear. (En tchèque.) *Ved. Prace. Vyzk. ust. Rostl. Vyr. Praze-Ruzyni.*, **14**, 133-142.

FORD M. A., THORNE G. N., 1967. Effect of CO_2 concentration on growth of sugar Beet, Barley, Kale and Maïze. *Ann. Bot.*, **31**, 629-644.

FRIEND D. J. C., 1969. Net assimilation rate of Wheat as affected by light intensity and temperature. *Canad. J. Bot.*, **47**, 1781-1789.

FRIEND D. J. C., 1966. The effects of light and temperature on the growth of cereals. In : *Growth of cereals and grasses*, Milthorpe and Ivins Ed. Butterworths, p. 181-199.

FRIEND D. J. C., POMEROY M. E., 1970. Changes in cell size and number associated with the effects of light intensity and temperature on the leaf morphology of Wheat. *Canad. J. Bot.*, **48**, 85-89.

FRIEND D. J. C. *et al.*, 1962. The rate of dry weight accumulation in *Marquis* Wheat, as affected by temperature and light intensity. *Canad. J. Bot.*, **40**, 939-955.

FUCHS M. *et al.*, 1971. Diurnal variations of the visible and near infra-red reflectance of a Wheat crop. *Israel J. Crop. Sci.* (sous presse.)

GAASTRA P., 1959. Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and respiration in detached leaves Soybean. *Plant. Physiol.*, **51**, 422-427.

GAUDILLÈRE J.-P., COSTES C., 1971. Les spectres d'action de l'assimilation photosynthétique du gaz carbonique chez les plantes supérieures. *Photosynthetica*, **5**, 272-316.

GESLIN H., 1944. *Étude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat. Contribution à l'étude du climat du Blé.* Thèse Doctorat d'État. Imprimerie nationale, Université de Paris, 116 p.

GESLIN H., JONARD P., 1948. Maturation du Blé et climat. *Ann. Nutrit. Aliment.*, Paris 361-371.

GHODDOUSSI D., 1970. *Influence of atmospheric carbon dioxide levels on absorption by plants*, Dissert. Abstr. intern. (B) 30, 5325 (abstract).

GMELIG-MEYLING H. D., 1967. *Influence of light quality on heading dates in cereals.* Inst. biol. scheik. Onderz, Landb. gewass. Med., 341-354, 85-88, 1967.

GOLDSWORTHY A., 1970. Photorespiration. *Bot. Rev.*, **36**, 321-340.

GRIGNAC P., 1965. *Contribution à l'étude de* Triticum durum DESF. Thèse Doctorat d'État, Univ. Toulouse, I. N. R. A., éd., 152 p.

GRUNDBACHER F. J., 1963. The physiological function of the ear awn. *Bot. Rev.*, **29**, 366-381.

HALLAIRE M., RAPILLY F., PAUPERT P., 1969. Effets de l'irrigation, sous ses différents modes, sur la biologie, l'éthologie et l'épidémiologie des maladies des plantes. *Ann. Phytopath.*, 9-29.

HANSEN G. K., 1971. Photosynthesis, transpiration and diffusion resistance in relation to water potential in leaves during water stress. *Acta Agric. Scand.*, **21**, 163-171.

HART R. H., LEE D. R., 1971. Age versus net carbon dioxide exchange rate on leaves of coastal Bermuda-grass. *Crop Sci.*, **11**, 598-599.

HATCH M. D., SLACK C. R., 1970. Photosynthetic CO_2 fixation pathways. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, **21**, 141-162.

HEATH O. V. S., RUSSELL J., 1954. Studies in stomata behavior. VI. An investigation of the light response of Wheat stomata with the attempted elimination of control by the mesophyll. *J. Exper. Bot.*, **5**, 1-15 et 269-292.

HERCHEL P., 1970. The intensity of Barley photosynthesis under defined conditions. *Res. project. B. A. B., Prog. rep.* 1, 105-109.

HEW C. S. *et al.*, 1969. Determination of the rate of CO_2 evolution by green leaves in light. *Plant Physiol.* **44**, 662-670.

HILLIARD J. H., WEST S. H., 1971. The association of chloroplast peripheral reticulum with low photorespiration rates in a photorespiring plant species. *Planta*, **99**, 352-356.

HODANOVA D., 1970. Canopy structure and photosynthetic rates as related to different leaf ages (in Wheat). *Prod. PT/PP/IBP, Czechoslov. Acad. Sci. Praha*, 179-180.

HOFSTRA G., HESKETH J. D., 1969. The effect of temperature on stomatal aperture in different species. *Can. J. Bot.*, **47**, 1307-1310.

HOPKINSON J. M., 1966. Studies on the expansion of the leaf surface. VI. Senescence and usefulness of old leaves. *J. exper. Bot.*, **17**, 762-770.

HSU P., WALTON P. D., 1971. Relationships between yield and its components and structures above the flag leaf node in spring Wheat. *Crop Sci.*, **11**, 190-192.

HUBIK E., 1971. On the study of the effect of CO_2 concentration in the air on dry matter increments in cereals (en tchèque). *Rostl. Vyr.*, **17**, 501-509.

INO Y., 1970. The effect of fluctuating light on photosynthesis. In : *Photosynthesis and utilization of solar energy*, level III experiments, 1969 Tokyo, Jap. nat. Subcomm. PP, p. 68-70.

JACKSON W. A., VOLK R. J., 1970. Photorespiration. *Annu. Rev. Plant. Physiol.*, **21**, 385-432.

JACQUES R., 1969. Action de la lumière rouge sur la croissance : spectre d'action et rôle du phytochrome. *C. R. Acad. Sci.*, sér. D, **269**, 1260-1263.

JOLIVET E., 1956. Fertilisation azotée du Blé d'hiver. II. Utilisation à des fins différentes de l'azote répandu semi-tardivement sur deux variétés très distinctes. *C. R. Acad. Agric.*, **42**, 483-489.

JOLLIFFE P. A., 1971. *Photosynthesis, photorespiration and related aspects of CO_2 exchange by Wheat, Corn, and* Amaranthus edulis. PhD, Univ. British Columbia. In « Diss. Abstr. intern., sér. B, **31** : 7138-7139 (abstract).

JOLLIFFE P. A., TREGUNNA E. B., 1968. Effect of temperature, CO_2, concentration and light intensity on oxygen inhibition of photosynthesis in Wheat leaves. *Plant. Physiol.*, **43**, 902-906.

JONARD P. *et al.*, 1952. Évolution de la tige et de l'épi chez la variété de Blé *V. 27* au cours de la période de reproduction. *Ann. Amélior. Pl.*, **2**, 31-54.

KAUL R., CROWLE W. L., 1971. Relations between water status, leaf temperature, stomatal aperture, and productivity of some Wheat varieties. *Z. Pflanzenzücht.*, **65**, 233-243.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1970 *a*. Evolutionary trends in leaf photosynthesis and related leaf characters among cultivated Wheat species and its wild relatives. *Jap. J. Breed.*, **20**, 133-140.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1970 *b*. Leaf photosynthesis and transpiration under different levels of air flow rate and light intensity in cultivated Wheat species and its wild relatives. *Jap. J. Breed*, **20**, 305-315.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1970 *c*. Differences in leaf photosynthesis and leaf transpiration rates among six commercial Wheat varieties of West Pakistan. *Jap. J. Breed.*, **20**, 344-350.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1970 *d*. Growth analysis of cultivated Wheat species and their wild relatives with special reference to dry matter distribution among different plant organs and to leaf area expansion. *Tohoku J. agric. Res*, **21**, 47-59.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1970 *e*. Classification of wild and cultivated Wheat strains based on their leaf structures. *Tohoku J. agric. Res.*, **21**, 118-125.

KHAN M. A., TSUNODA S., 1971. Comparative leaf anatomy of cultivated Wheats and wild relatives with reference to their leaf photosynthetic rates. *Jap. J. Breed.*, **21**, 143-150.

KHISAMUTDINOVA V. I., VASIL'EVA I. M., 1970. Changes in respiration energetics of winter Wheat tillering nodes during hardening. *Sov. Pl. Physiol.*, **17**, 746-750.

KING R. W. *et al.*, 1967. Effect of assimilate utilization on photosynthetic rate in Wheat. *Planta*, **77**, 261.

KOLBE W., 1970. Nouvelles recherches sur les pertes de rendement dues aux pucerons dans les cultures de céréales (en allemand). *Pflanzensch. Nachtricht.*, Bayer, **23**, 150-168.

KOLDERUP F., 1970. Effect of temperature and day length on seed setting in some varieties of common spring Wheat. *Meld. Norges Landsrukshogsk.*, **49** (32), 10 p.

KOPECKY M., 1970. The influence of the intensity of solar radiation on the K 20 intake and on the formation of the yields of summer Barley. *Product. terrest. commun. Czechoslov. Acad. Sci. Praha*, 195-196.

KOSHKIN V. A., BYKOV O. D., 1970. Temperature curves of potential intensity of photosynthesis of spring Wheats of different origins. (En russe.) *Dokl. Vses. Akad. sel'sjood. Nauk im. Lenina*, **12**, 10-11.

KRZYWACKA T., 1971. Influence of the flag leaf and ear assimilation area on Wheat yields. (En polonais.) *Hodowla Rosl. Aklim. Nasienn.*, **15**, 51-69.

KULAEVA O. N., KLYACHKO N. L., 1967. Action of puromycin on protein synthesis in leaves of different ages. *Dokl. bot. Sci.*, 174-175, 105-108.

LAMBOLEY G., 1970. Mesure du rayonnement solaire. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la Biosphère*, I. N. R. A. éd., 45-58.

LAST F. T., 1963. Metabolism of Barley inoculated with *Erisiphe graminis* MÉRAT. *Ann. Bot.*, **27**, 685-691.

LEOPOLD A. C., 1963. Kinins and the regulation of leaf senescence. In *Regulateurs naturels de la croissance* Coll. C. N. R. S., nº 123, p. 705-718, 1964.

LUCAS D., ASANA R. D., 1968. Effect of defoliation on the growth and yield of Wheat. *Physiol. Plant.*, **21**, 1217-1223.

LUPTON F. G. H., 1966. Translocation of photosynthetic assimilates in Wheat. *Ann. appl. Biol.*, **57**, 355-364.

LUPTON F. G. H., ALI M. A. M., 1966. Studies on photosynthesis in the ear of Wheat. *Ann. appl. Biol.*, **57**, 281-286.

LUPTON F. G. H., 1969. Estimation of yield in Wheat from measurements of photosynthesis and translocation in the field. *Ann. appl. Biol.*, **65**, 363-374.

LUPTON F. G. H. *et al.*, 1967. Varietal differences in growth parameters of Wheat and their importance in determining yield. *J. Agric. Sci. Cambridge*, **69**, 111-123.

LYAPSHINA Z. F., 1967. Relationship between grain yield and leaf area and dry matter accumulation in the ontogeny of soft spring Wheat. *Soviet Pl. Physiol.*, **14**, 61-64.

LYKOVSKI B., 1968. Sur les mesures de l'albedo des plantes vertes (en polonais). *Ekol. Pol.*, sér. B, **14**, 43-47.

MCBEE G. G., 1969. Association of certain variations in light quality with the performance of selected Turfgrass. *Crop Sci.*, **9**, 14-18.

MCCREE K. J., 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. meteorol.*, **9**, 191-216.

MCCREE K. J., LOOMIS R. S., 1969. Photosynthesis in fluctuating light. *Ecology*, **50**, 422-428.

MCNEAL F. H. *et al.*, 1969. Agronomic and quality characteristics of awned and awnlessed populations of spring Wheat. *Crop Sci.*, **9**, 333-335.

MALOFEEV V. M. *et al.*, 1971. Activité photosynthétique des pousses de Blé d'automne pendant l'automne (en russe). *Dokl. Tskha*, **162**, 226-231.

MARENKOV A. Ya. *et al.*, 1971. Effet de la nutrition minérale sur la modification des propriétés xéromorphiques des feuilles de Blé d'hiver (en russe). *Fiziol. Rast.*, **18**, 135-141.

MEIDNER H., 1970. Light compensation points and photorespiration. *Nature*, **228**, 1349.

MENZ K. M. *et al.*, 1969. Screening for photosynthetic efficiency. *Crop Sci.*, **9**, 692-694.

MERMIER M., METHY M., 1970. Mesure du rayonnement net. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la Biosphère*, I. N. R. A. éd., 71-78.

METHY M., 1970. Les méthodes de mesure de la composition spectrale du rayonnement global. In : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la Biosphère*, I. N. R. A. éd., p. 79-88.

MOHR H., 1970. Mechanism of action of phytochrome. *Biochem. J.*, **119**, 3-4.

MOSS D. N. *et al.*, 1969. Carbon dioxide compensation points in related plant species. *Science*, **164**, 187-188.

NATR L., 1963. Différences variétales dans la photosynthèse du Blé d'hiver (en tchèque). *Rostl. Vyr.*, **10**, 5-10.

NATR L., 1971. The effect of *fusicoccin* on gas exchange of detached Barley leaves. *Photosynthetica*, **5**, 195-199.

NATR L., 1972. Influence of mineral nutrients on photosynthesis of higher plants. A review. *Photosynthetica*, **6**, 80-99.

NEALES T. F. *et al.*, 1963. The role of the leaves in the accumulation of nitrogen by Wheat during ear development. *Austral. J. agric. Res.*, **14**, 725-736.

NEALES T. F., INCOLL L. D., 1968. The control of leaf photosynthesis rate by the level of assimilate concentration in the leat : a review of the hypothesis. *Bot. Rev.*, **34**, 107-125.

O'BRIEN T. P., ZEE S. Y., 1971. Vascular transfer cells in the vegetative nodes of Wheat. *Austral. J. biol. Sci.*, **24**, 207-217.

OSMAN A. M., MILTHORPE F. L., 1971. Photosynthesis of Wheat leaves in relation to age, illuminance and nutrient supply. *Photosynthetica*, **5**, 55-70.

PARCEYAUX S. de, 1972. *Contribution à l'étude des échanges gazeux au niveau des feuilles : rôle des résistances ou longueurs de diffusion en écophysiologie.* Thèse Doct. État A/920 C. N. R. S., Université de Paris-Sud, 150 pp.

PEARCE R. B., 1967. *Photosynthesis in plant communities and individual leaves as influenced by leaf angle, leaf area index and leaf age.* Diss. Abstr. B, **27**, 3759 (abstract).

PEARCE R. B. *et al.*, 1967 *a*. Net photosynthesis of Barley seedlings as influenced by leaf area index. *Crop. Sci.*, **7**, 545-546.

PEARCE R. B. *et al.*, 1967 *b*. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angle. *Crop Sci.*, **7**, 321-325.

PEARCE R. B. *et al.*, 1969. Specific leaf weight and photosynthesis in alfalfa. *Crop Sci.*, **9**, 423-425.

PERCIVAL J., 1921. *The Wheat plant.* A monograph. Duckworth and Co. London.

PERRIN DE BRICHAMBAUT Ch., 1963. *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels*, Gauthier-Villars éd., Paris, 200 p.

PETERSON R. F., 1965. *Wheat. Botany, cultivation and utilization*, London L. Hill Books, Interscience, N. York Publ., 422 p.

PLANCHON C., 1968. Activité photosynthétique de la dernière feuille et rendement en grain du Blé tendre (*Triticum æstivum* L.). *C. R. Acad. Sci., D*, **265**, 123-125.

PLANCHON C., 1969. Activité photosynthétique et rendement chez le Blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Ve Congrès Eucarpia, Milan 1968. *Genet. agr.*, **23**, 485-490.

PLANCHON C., 1971. Relation entre l'assimilation chlorophylienne nette, la teneur en chlorophylle *a* et la température chez le Blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *C. R. Acad. Sci.*, D, **272**, 68-71.

PRISTUPA N. A., 1964. Redistribution of radioactive assimilates in leaf tissues of cereals. *Soviet plant physiol.*, **11**, 38-42.

PUCKRIDGE D. W., 1970. A quantitative account of the influence of solar radiation, water and nitrogen supply on the photosynthesis of Wheat communities in the field. In Coll. Unesco Uppsala. *Réponse pl. fact. climat.*, 15 p.

PUCKRIDGE D. W., 1971. Photosynthesis of Wheat under field conditions. III. Seasonal trends in carbon dioxide uptake of crop communities. *Austral. J. agric. Res.*, **22**, 1-9.

RAWSON H. M., 1971. Tillering patterns in Wheat with special reference to the shoot at the coleoptile node. *Austral. J. biol. Sci.*, **24**, 829-841.

RAWSON H. M., EVANS L. T., 1971. The contribution of stem reserves to grain development in a range of Wheat cultivars of different heights. *Austral. J. agric. Res.*, **22**, 851-863.

RAWSON H. M., HOFSTRA G., 1969. Translocation and remobilization of ^{14}C assimilates at different stages by each leaf of the Wheat plant. *Austral. J. biol. Sci.*, **22**, 321-331.

RAZORIONOV T. A., NILOVSKAYA N. T., 1971. Dark respiration of some vegetable plants related to their taxonomy and age (en russe). *Fiziol. Rast.*, **18**, 501-506.

RASTOCI V. K., SINGH S. P., 1969. A note on effect of defoliation on seed yield in durum Wheat. *Indian J. Agron.*, **14**, 241-242.

ROBINSON N., 1966. *Solar radiation.* Elsevier publishing Cy Amsterdam, 347 p.

SACHS J. von, 1874. *Botanique.* F. Savy éd., Paris, 1 180 p.

SACHS J. von, 1883. Ein Beitrag zur Kenntniss der Ernährungsfähigkeit der Blätter. *Arb. Bot. Inst. Würzburg*, **3**, 1-33.

SAGHIR A. R. *et al.*, 1968. Effects of plant parts on the grain yield, kernel weight and plant height of Wheat and Barley. *Agron. J.*, **60**, 95-97.

SALIN M. L., HOMANN P. H., 1971. Changes of photorespiratory activity with leaf age. *Plant Physiol.*, **48**, 193-196.

SCOTT D. *et al.*, 1968. Spectral analysis of radiation transmitted and reflected by different vegetations. *New Zealand J. Bot.*, **6**, 427-449.

SESTAK Z., CATSKY J., JARVIS P. G., 1971. *Plant photosynthetic production.* Manual of methods. Dr W. Junk N. V. Publishers The Hague, 818 p.

SIDDIQI M. Q., MANNERS J. G., 1971. Some effects of general yellow rust (*Puccinia striiformis* WESTEND) infection on ^{14}Carbon assimilation, translocation and growth in spring Wheat. *J. exper. Bot.*, **22**, 792-800.

SIMPSON G. M., 1968. Association between grain yield per plant and photosynthesis area above the flag-leaf node in Wheat. *Canad. J. Plant Sci.*, **48**, 253-260.

STANHILL G., 1970. Some results of helicopter measurements of the albedo of different land surfaces. *Solar Energy*, **13**, 59-66.

STANHILL G. *et al.*, 1971. The effect of fertilizer application on solar reflectance from a Wheat crop. *Israel J. crop Sci.* (sous presse.)

STOY V., 1963. The translocation of ^{14}C-labelled photosynthetic products from the leaf to the ear of Wheat. *Physiol. Plant.*, **16**, 851-866.

STOY V., 1966. Photosynthetic production after ear emergence as yield limiting factor in the culture of cereals. *Acta Agr. Scandinav.*, suppl. 16, 178-182.

STREBEYKO P. *et al.*, 1961. Mesures de la croissance des céréales dans les conditions naturelles (en polonais). *Pom. Wzpostu Zboz Warun. Polow. Rocs. Nauk. Rolnicz.*, sér. D, **90**, p. 1-20.

SVEC L. V., 1970. *Respiratory activity and chemical composition of winter Barley seedlings grown in controlled and field environment.* Diss. Abstr. internat., sér. B, **31**, 1658 (abstract).

SYBANENKOV K. Zh., 1966. Comparative data on the rate of photosynthesis and transpiration of different organs in awned and awnless forms of Wheat (en russe). *Bot. Ah.*, **53**, 1628-1632.

SZEICZ G., 1969. Radiation transmission and foliage area profiles in crops. *Mimeographed, Rothamsted Expt. Stn.*, 37 p.

TAKANO Y., TSUNODA S., 1971. Curvilinear regression of the leaf photosynthetic rate on leaf nitrogen content among strains of *Oryza species*. *Jap. J. Breed.*, **21**, 69-76.

TEARE I. D., PETERSON G. J., 1971. Surface area of chlorophyll-containing tissue on the inflorescence of *Triticum aestivum* L. *Crop Sci.*, **11**, 627-628.

TEARE I. D. *et al.*, 1971. Size and frequency of stomata in cultivars of *Triticum aestivum* L. and other *Triticum* species. *Crop Sci.*, **11**, 496-498.

THORNE G. N., 1965. Photosynthesis of ears and flag leaves of Wheat and Barley. *Ann. Bot.*, **29**, 317-329.

THORNE G. N. *et al.*, 1969. Growth and yield of six short varieties of spring Wheat derived from *Norin 10* and two european varieties. *Ann. Appl. Biol.*, **63**, 241-251.

TREGUNNA E. B. *et al.*, 1964. Further evidence on the effects of light on respiration during photosynthesis. *Canad. J. Bot.*, **42**, 989-997.

TREHARNE K. J. *et al.*, 1968. Growth response of Orchardgrass (*Dactylis glomerata* L.) to different light and temperature environments. *Crop Sci.*, **8**, 441-445.

TRUNOVA, 1970. Sugar accumulation in chloroplasts of Winter Wheat plants during hardening. *Soviet Plant Physiol.*, **17**, 751-754.

USOVA T. K., BORZHKOVSKAYA G. D., 1970. Energy efficiency of respiration in winter plants under different temperature conditions. *Soviet Pl. Physiol.*, **17**, 971-974.

VARLET-GRANCHER Cl., BONHOMME R., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. III. Composition spectrale de la lumière dans la culture. *Ann. agron.*, **22**, 515-526.

VINCENT A., 1962. Communication personnelle.

VINCENT A., 1971. Régulation du métabolisme par le système phytochrome ascorbique. *Congrès Eucarpia*, Dijon (20-22-X-1970). Section Céréales-Physiologie, p. 11-81.

VIRGIN H. I., 1956. Light induced stomata movements in Wheat leaves recorded as transpiration. Experiments with corona-hygrometer. *Physiol. plant.*, **9**, 280-303.

WALPOLE P. R., MORGAN D. G., 1971. Acceleration of senescence induced in Wheat by light. *Nature*, **230** (14), 190-192.

WARDLAW I. F., 1963. Translocation of photosynthetic assimilates. *C. S. I. R. O. Plant Industry Ann. Rep.*, 1963ï64, 100.

WARDLAW I. F., 1967. The effect of water stress on translocation in relation to photosynthesis and growth. I. Effect during grain development in Wheat. *Austral. J. Biol. Sci.*, **20**, 25-26.

WARDLAW I. F., 1968. The control and patterns of movement of carbohydrates in plants. *Bot. Rev.*, **24**, 79-105.

WARDLAW I. F. *et al.*, 1965. The relation supply of carbohydrate and nitrogen to Wheat grain and an assessment of the shading and defoliation techniques used for these determinations. *Austral. J. agric. Res.*, **16**, 983-901.

WARDLAW I. F., PORTER H. K., 1967. The redistribution of stem sugars in Wheat during grain development. *Austral. J. biol. Sci.*, **20**, 309-318.

WATANABE H., YOSHIDA S., 1970. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on photophosphorylation in Rice in relation to the photosynthetic rate of single leaves. *Soil Sci. Plant Nutrit.*, **16**, 163-166.

WATSON D. J. *et al.*, 1966. Changes with age in the photosynthetic and respiratory components of the net assimilation rates of sugar Beets and Wheat. *New Phytol.*, **65**, 500-508.

WELBANK P. J. *et al.*, 1966. Dependance of yields of Wheat varieties on their leaf area duration. *Ann. Bot.*, **30**, 291-299.

WELBANK P. J. *et al.*, 1968. Effect of radiation and temperature on efficiency of cereal leaves during grain growth. *Ann. Bot.*, **32**, 79-95.

WILLIAMS R. F., 1960. The physiology of growth in the Wheat plant. I. Seedling growth and the pattern of growth at the shoot apex. *Austral. J. biol. Sci.*, **13**, 401-428.

WILLIAMS R. F., 1966. The physiology of growth in the Wheat plant. III. Growth of the primary shoot and inflorescence. *Austral. J. biol. Sci.*, **19**, 949-966.

WILLIAMS R. F., RIJVEN A. H. G. C., 1965. The physiology of growth of the Wheat plant. II. The dynamics of leaf growth. *Austral. J. biol. Sci.*, **18**, 721-743.

WILSON G. L., 1966. Studies on the expansion of the leaf surface. V. Cell division and expansion in a developing leaf as influenced by light and upper leaves. *J. exper. Bot.*, **17**, 440-451.

WILSON D., 1970. Starch and apparent rate of photosynthesis of leaves of *Lolium perenne* grown at different temperatures. *Planta*, **91**, 274-278.

Ann. agron., 1973, **24** (1), 33-62.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES SOLS DE LA NAPPE DÉTRITIQUE BOURBONNAISE

J.-C. FAVROT, J.-P. LEGROS et M. DUPUIS
avec la collaboration technique de G. BOYER

Service d'Étude des Sols,
Centre de Recherches de Montpellier, I. N. R. A.
34060 Montpellier Cedex

RÉSUMÉ

Au nord du Massif Central, les « sables et argiles du Bourbonnais » forment une vaste couverture détritique issue des reliefs cristallins de bordure.

Les « argiles » ont donné naissance à des sols de profil A, B_g, C_g désaturés, répartis schématiquement en sols lessivés à pseudogley (sur replats) et bruns lessivés à pseudogley (sur pentes).

Sur les « sables » se sont développés, selon la position topographique, des sols à profil uniforme ou des sols à profil contrasté, du type planosol.

L'étude de terrain et l'approche analytique font ressortir le rôle de la topographie et de la roche-mère sur les processus pédogénétiques (et par suite, les incidences agronomiques de ces facteurs).

Pour dégager les grands traits de la pédogenèse régionale, un schéma d'articulation des grandes unités pédologiques est proposé. L'interprétation statistique des données d'analyse permet de caractériser ces grandes unités et d'établir des relations faisant apparaître des liaisons parfois très étroites entre la dynamique du fer et celle de l'argile.

Ces liaisons sont discutées en fonction de quatre types de roches-mères et de deux types de positions topographiques.

INTRODUCTION

Malgré sa grande extension (7 000 km²), la formation dite des « sables et argiles du Bourbonnais » n'a pas fait, jusqu'à présent, l'objet de nombreux travaux scientifiques. Au plan géologique, les auteurs se sont surtout attachés à dater les dépôts (DANGEARD, 1963 ; DELAUNAY, 1923 ; JUNG, 1946), et seules quelques reconnaissances d'ordre pédologique ont été entreprises sur des surfaces limitées (DEWOLF, 1962).

A partir de 1966, le Service d'Étude des Sols — I. N. R. A. de Montpellier — a réalisé plusieurs études intéressant près de la moitié de cette formation, avec cartographie à moyenne échelle (BORNAND *et al.*, 1968 ; FAVROT, 1969) et à grande échelle (BONFILS et LABAU, 1969 ; LEGROS et BOYER, 1969 ; SERVANT, 1966).

Ces études ont montré que sous une homogénéité d'ensemble, liée à une certaine unité de climat, de couverture végétale et à une relative régularité du relief, les sols de la nappe détritique bourbonnaise présentaient en fait, dans le détail, des faciès assez variés.

De l'inventaire détaillé de ces faciès ressort une certaine loi de répartition des grandes unités de sols dont la genèse et la distribution spécifiques peuvent s'expliquer par l'analyse du contexte géomorphologique régional.

Dans cette note, nous nous proposons précisément de mettre en évidence ces unités, de les définir sous un angle statistique, de rechercher les liaisons existant entre certaines de leurs caractéristiques (fer, argile), afin de mieux comprendre *in fine* les conditions de leur genèse et leur comportement agronomique.

I. — LE MILIEU NATUREL

La nappe détritique étudiée prolonge au nord du Massif central les dépressions de Limagne et du Forez. Elle couvre l'ensemble de la Sologne bourbonnaise entre Loire et Allier, débordant à l'ouest sur le Bocage bourbonnais, à l'est sur le Charolais, au nord sur le Nivernais (fig. 1).

La morphologie est assez régulière : c'est une vaste surface d'altitude comprise entre 200 et 400 m, s'inclinant lentement vers le nord et découpée en interfluves de relief plan ou légèrement ondulée par un réseau hydrographique très dense ; elle est parsemée également d'innombrables étangs artificiels qui constituent l'un des traits dominants du paysage.

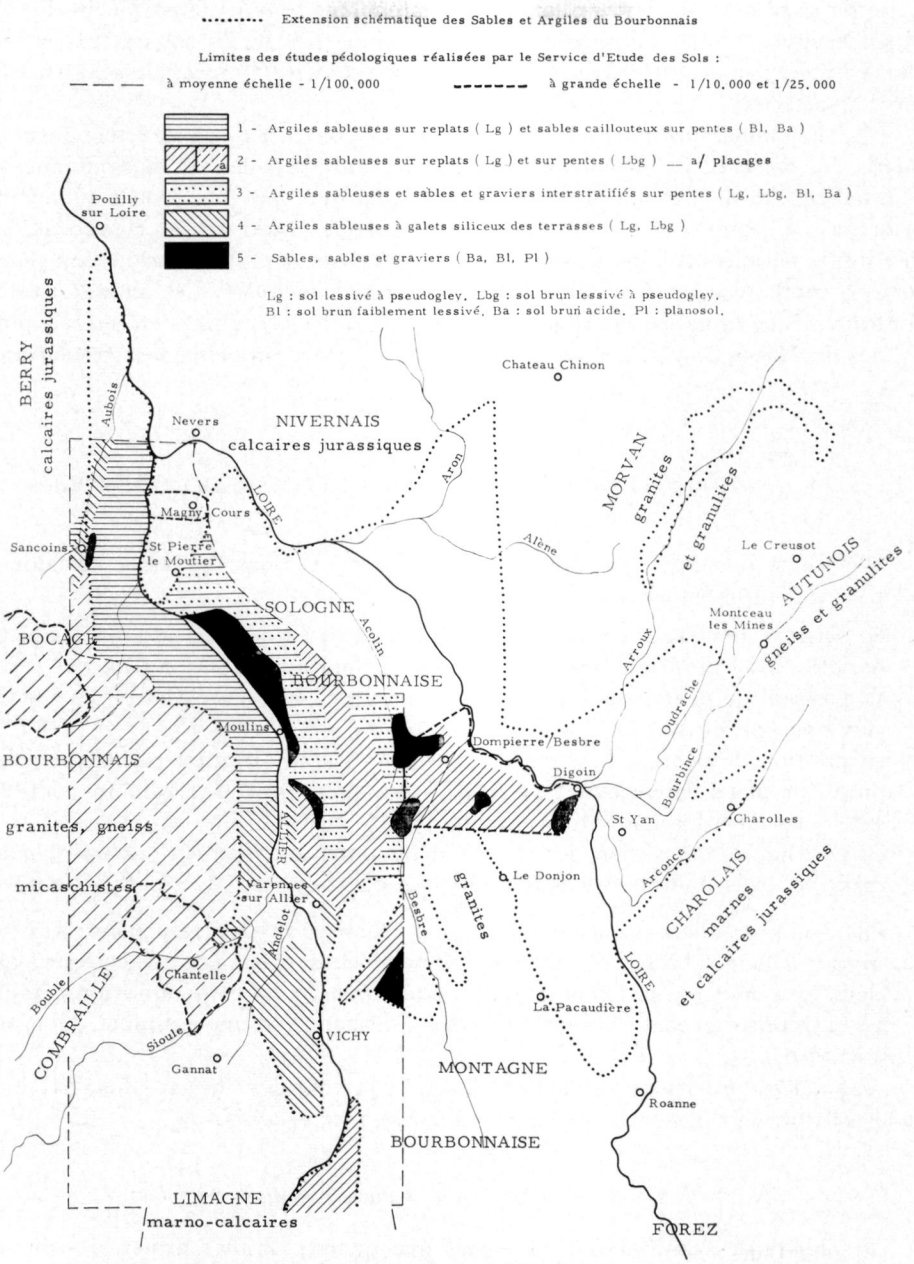
L'agriculture s'oriente de plus en plus vers l'élevage bovin (race *charolaise*) et ovin. Les prairies dominent, associées à des cultures céréalières surtout. Le modelé des champs en ados témoigne de l'humidité des terres. A ce paysage bocager se juxtaposent des massifs forestiers importants où le chêne constitue l'essence principale.

Le climat régional est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle de 700 à 850 mm assez régulièrement répartie dans le temps et par une température moyenne annuelle de 10,5°C.

Du point de vue géologique cette nappe détritique est datée du Mio-Pliocène. D'épaisseur variable, (plusieurs dizaines de mètres au centre, quelques mètres en bordure), elle est formée de matériaux acides qui sont plus grossiers et plus hétérogènes au contact des reliefs érodés (Sologne bourbonnaise), qu'en aval sur la rive gauche de l'Allier. Elle recouvre des calcaires primaires et secondaires et partiellement, sous forme de placages, les argiles et grès permo-triasiques ainsi que le socle cristallin. Elle ressemble lithologiquement aux matériaux des hautes terrasses de l'Allier, d'une origine géologique pourtant sensiblement différente.

Une argile bariolée, à charge sableuse variable, constitue le faciès principal ;

FIG. 1. — *Extension des sables et argiles du Bourbonnais*



Répartition schématique des formations superficielles dans les secteurs cartographiés

elle occupe toutes les surfaces subhorizontales mais affleure également sur les pentes entre Loire et Allier. Elle est juxtaposée à des matériaux siliceux grossiers occupant les versants des vallées, notamment en Bocage bourbonnais. En Sologne bourbonnaise de nombreux secteurs vallonnés présentent une grande hétérogénéité lithologique résultant d'une imbrication très anarchique des faciès sableux et argileux (fig. 1). Sur les hautes terrasses, l'argile sableuse est mêlée d'un cailloutis essentiellement quartzeux.

L'étude minéralogique de la fraction fine (LOUDYI, 1969) révèle l'abondance du quartz, la présence de feldspaths et parmi les minéraux lourds la dominance de tourmaline, zircon, andalousite associés à la staurotide, au grenat, à la sillimanite, au sphène, à l'épidote et à la trémolite, en proportions variables. La charge sableuse des argiles bariolées se répartit surtout dans les fractions granulométriques moyennes (0,7-0,8 mm) avec un fort pourcentage de grains non usés. Ces caractéristiques confirment que la nappe bourbonnaise dérive de séries cristallines et crystallophylliennes du Massif central à la suite d'une mise en place probablement très brutale.

II. — DÉFINITION DES GRANDES UNITÉS PÉDOLOGIQUES

Schématiquement les grandes unités de sols du Bourbonnais se distribuent selon la topo-lithoséquence suivante :

— en position de plateau ou de replat : sols lessivés à pseudogley sur argile sableuse bariolée, avec profil du type A_p, A_{2g} , B_g, C_g (unités 8 *a*, 8 *b* ; fig. 5) ;
— en position de pente, sur argile sableuse bariolée : sols bruns lessivés à pseudogley avec profil du type A_p, B_g, C_g (unités 7*a*, 7*b*) ;
— en position de pente, sur matériaux grossiers (sables et graviers épais) : sols à profil très peu différencié du type A (B), C (unités 5 *b*, 5 *c*) ou un peu plus contrasté si le substrat est argilo-sableux (unité 6) ;
— en position de dépression, lorsque les dépôts sableux reposent sur un plancher argileux : sols hydromorphes à profil très contrasté A_1, A_{2g}, II BC_g (unité 9).

Les deux premiers termes de cette topo-lithoséquence, correspondant aux sols sur argiles sableuses bariolées, sont très fréquents en Bourbonnais ; ils couvrent plus des deux tiers de la formation géologique mio-pliocène. Leur caractérisation détaillée a été entreprise en s'appuyant sur l'étude statistique d'une centaine de profils représentatifs.

Les autres formations (sables et cailloutis) couvrent des surfaces plus restreintes et les sols qu'elles portent seront plus succinctement évoqués.

A. — *Les sols développés sur argiles sableuses bariolées*

Il ressort des conditions géologiques que quatre familles principales de sols sur argiles sableuses peuvent être différenciées, correspondant :

— à la nappe détritique continue et épaisse observée en Bocage et Sologne bourbonnaise,

— aux placages discontinus de plateaux cristallins (Combraille bourbonnaise),
— aux placages discontinus sur argiles et grès permiens (bassin de Bourbon-l'Archambault),
— aux alluvions quaternaires des hautes terrasses de l'Allier (ouest de Vichy).

Par ailleurs, il apparaît nécessaire de distinguer les sols de pente des sols de replat.

Cependant, l'uniformité d'ensemble de la formation géologique étudiée se retrouve au niveau des sols qui, par-delà la variabilité de caractéristiques particulières liées à la situation topographique, présentent de nombreux caractères communs.

1° *Sols lessivés à pseudogley sur argile sableuse de replat.*

Pour l'ensemble de la nappe détritique bourbonnaise, la présence, sur toutes les surfaces sub-horizontales, de sols lessivés à pseudogley dont l'homogénéité est remarquable, constitue un élément original et caractéristique de la répartition des sols.

Ceux-ci sont définis spécifiquement par un horizon A_{2g} de couleur blanchâtre (en sec), tacheté de rouille, renfermant des concrétions ferro-manganiques en proportion variable, et par un horizon B_g, bariolé, argileux, apparaissant vers 50 cm de profondeur.

La texture du premier horizon est plus limoneuse que dans les sols de pentes (50 à 60 p. 100 de limons), cette composition granulométrique favorisant le phénomène de battance observé sous culture. Les teneurs en fer totale et en fer libre y sont généralement faibles; on verra plus loin qu'elles constituent un repère caractéristique de ce type de sol.

Dans l'horizon B_g, le taux d'argile atteint 30 ou 40 p. 100.

Pour cette unité les études minéralogiques montrent que la différenciation des profils est due uniquement à une évolution pédologique *in situ*, en l'absence de phénomènes d'ordre géologique ou géodynamique. Cette observation est encore vraie sur pente tant que la déclivité n'est pas suffisamment marquée pour favoriser des remaniements liés à l'érosion (troncature, colluvionnement).

2° *Sols bruns lessivés à pseudogley sur argile sableuse de pente.*

Sur une grande partie de la Sologne bourbonnaise, les pentes sont occupées par des sols présentant *un horizon B argillique bariolé* (pseudogley) aux caractéristiques assez constantes, à part quelques faibles fluctuations texturales. Toutefois, la profondeur d'apparition de cet horizon peut varier (30 à 60 cm) selon l'importance relative de l'érosion ou du colluvionnement.

L'horizon supérieur (A_{11}), sablo-limoneux à limono-sableux, toujours bien drainé et de couleur brune ou grise, repose généralement sur un horizon A_{12} légèrement plus clair. Les profils à horizon A_2 bien différencié sont rares.

Pour des sols présentant des horizons B_g de granulométrie comparable, on constate que la texture de l'horizon de surface est d'autant plus grossière que la pente est plus accentuée :

— zone plane : 40 p. 100 de sables totaux en moyenne
— pente faible : 50 — — — —
— pente forte : 65 — — — — .

L'une des caractéristiques de ces sols est en outre la fréquence des mouillères, phénomène très localisé dans l'espace, mais se traduisant dans certains profils par la présence de véritables cuirasses ferrugineuses (« mâchefer » ou « chameron »).

3° *Caractères communs à ces deux unités.*

La variabilité relativement faible des caractéristiques des sols sur argiles sableuses bariolées permet de dégager des traits communs :

— *Du point de vue morphologique*, on peut définir un « profil moyen » dont les caractères, sous culture, seraient les suivants :

A_p 0/20-25 cm : horizon de labour, gris ou brun, de texture moyenne (sable argileux, sable limoneux ou limon sablo-argileux). Battant en surface, tassé par les instruments agricoles, peu structuré. Activité biologique bonne. Racines plus ou moins gainées de rouille suivant la pente et la texture. Transition nette, régulière.

A_{2g} A_{12g} 20-25 cm/35-40 cm : horizon plus clair avec quelques taches brun jaunâtre, étendues, contrastées, à limite peu nette. Même texture. Concrétions ferro-manganiques de 2 à 5 mm. Gorgé d'eau une partie de l'année. Transition nette, régulière.

B_{1g} 35-40/50-60 cm : bariolage gris et orangé moyennement contrasté. Structure massive à prismatique. Quelques concrétions. Activité biologique faible : racines rares, localisées dans des veines grises argileuses. Transition distincte.

B_{2g} 50-60/80-100 cm : bariolage très contrasté sous forme de taches gris blanc (10 YR 5/1 ou 7/1) et orangé (7,5 YR 6/8). Texture fine (argilo-sableuse, limono-argilo-sableuse). Revêtements argileux minces recouvrant les agrégats. Structure prismatique à débit polyédrique, moyennement développée. Activité biologique très faible. Transition graduelle.

C_g 80-100 cm et plus : bariolage moins contrasté. Légèrement moins argileux. Structure prismatique peu développée. L'épaisseur peut être considérable (plusieurs mètres).

Sous forêt (chênaie acidiphile), une différenciation intervient au niveau des horizons supérieurs : il se développe en surface un humus de type mull acide, de 2 à 3 cm, surmontant un horizon A_1 humifère, brun gris, plus poreux, où le chevelu racinaire est extrêmement dense. Par ailleurs, sous culture comme sous forêt, une nappe perchée temporaire affecte les horizons A pendant plusieurs mois par an.

Par rapport au faciès moyen défini plus haut, quelques variantes — dont la représentation cartographique n'est pas toujours possible — sont observées :

— Dans certains profils, il y a passage brutal de l'horizon A_{2g} à l'horizon argillique : le profil présente alors un faciès planosolique ; ailleurs la présence de langues blanchâtres sous l'horizon A_{2g} témoigne de la dégradation de l'horizon argillique (sols lessivés glossiques à pseudogley). Ces glosses, formées de grains quartzeux, prolongent les veines grises verticales (fig. 2).

— Le bariolage des horizons B_g et C_g peut s'exprimer soit sous forme « organisée » (fig. 2 et 2′) par un réseau de veines grises distribuées suivant des directions préférentielles, généralement verticales et obliques, parfois horizontales, au sein d'une matrice ocre, soit sous une forme « anarchique » par une juxtaposition de taches grises et ocre aux contours très irréguliers. Dans les deux cas, les zones grises sont toujours plus humides que la matrice ocre (qui peut s'indurer jusqu'à former des noyaux distincts) ; en outre, cause ou conséquence, les racines occupent toujours ces zones grises de circulation préférentielle de l'eau (PLAISANCE, 1953).

Le tableau 1 concrétise la répartition de l'argile et du fer dans les horizons bariolés B_g et C_g.

Dans ces horizons, les veines ou taches grises sont plus riches en argiles (illuviation secondaire) et *a contrario* plus pauvres en fer (libre ou total) que la matrice ocre. De plus, le rapport fer libre/fer total y est plus faible. Encore les différences sont-elles atténuées par l'impossibilité d'un prélèvement réellement sélectif. Ces résultats montrent en particulier que la couleur grise correspond à un départ effectif du fer et pas seulement à des phénomènes de réduction, le fer libéré diffusant latéralement pour former le cortex ocre vif entourant les veines grises (fig. 2′).

Le fer peut aussi — associé au manganèse — se rencontrer en concrétions noirâtres plus ou moins dures et abondantes, d'une part dans l'horizon A_{2g}, d'autre part en B et C (fig. 2 et 2′) avec parfois concentration et constitution d'un alios très dur, mais toujours très localisé dans l'espace et lié à des zones de passage de l'eau.

TABLEAU I

Répartition de l'argile et du fer dans les horizons B_g et C_g

Localisation	Caractéristiques	Taches ou traînées grises	Fond ocre
Dompierre/Besbre P. 27 — Horizon B_g (55-85 cm)	Argile (p. 100)	31,2	23,9
	Fer total —	1,25	2,22
	Fer libre —	0,45	1,86
	Fer libre/Fer total	0,36	0,84
Dompierre/Besbre P. 34 — Horizon B_g (60-95 cm)	Argile (p. 100)	36,5	23,6
	Fer total —	1,84	3,37
	Fer libre —	0,63	2,30
	Fer libre/Fer total	0,34	0,68
Dompierre/Besbre P. 34 — Horizon C_g (95-130 cm)	Argile (p. 100)	28,5	26,3
	Fer total —	2,09	3,21
	Fer libre —	1,03	2,41
	Fer libre/Fer total	0,54	0,75
Moulins P. 241 — Horizon C_g (98-115 cm)	Argile (p. 100)	32,2	19,2
	Fer total —	1,73	2,23
	Fer libre —	0,62	1,37
	Fer libre/Fer total	0,36	0,61
Moulins P. 246 — Horizon C_g (110-120 cm)	Argile (p. 100)	13,7	15,6
	Fer total —	1,73	2,51
	Fer libre —	0,74	1,77
	Fer libre/Fer total	0,42	0,70

— *Du point de vue analytique,* les sols sur argile sableuse bariolée, non caillouteux dans leur ensemble en Bourbonnais (sauf sur les hautes terrasses de l'Allier) sont caractérisés :

  — par un accroissement vertical très important du taux d'argile qui passe de 5-10 p. 100 en A_1 à 30-40 p. 100 en B_g, les teneurs diminuant légèrement à la base des profils pour rester ensuite sensiblement constantes sur plusieurs mètres de profondeur,

  — par l'influence de la mise en valeur agricole sur les propriétés chimiques de l'horizon A_{11} : humifère (2 à 5 p. 100 de matière organique à C/N voisin de 18) et acide (pH voisin de 4,5) sous forêt, il se transforme sous culture en un A_p beaucoup moins humifère (2 p. 100 de matière organique à C/N voisin de 10), moins acide (pH 5,5 à 6,5) et à taux de saturation variable.

Par ailleurs, les teneurs en potassium et en sodium échangeables sont très faibles. Une augmentation importante du taux de magnésium avec la profondeur est très souvent notée. En moyenne, la capacité d'échange passe de 10 à 15-20 mé. pour 100 g de l'horizon A_1 à l'horizon B_g.

Les données relatives à l'entraînement de l'argile et du fer ont paru suffisamment remarquables pour justifier une discussion particulière (III).

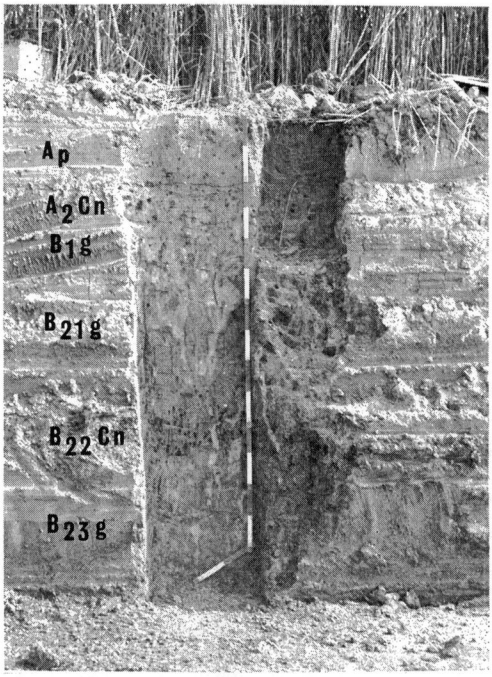


FIG. 2. — *Sol lessivé glossique à pseudogley*

Carrière de Diou près de Dompierre-sur-Besbre (Allier). Profil typique avec horizons A_p et A_2C_n riches en concrétions ferrugineuses passant vers 50 cm au plancher argileux (horizon B_g) à veines verticales grises sur fond ocre. Un deuxième niveau de concrétions s'observe vers 1 m.

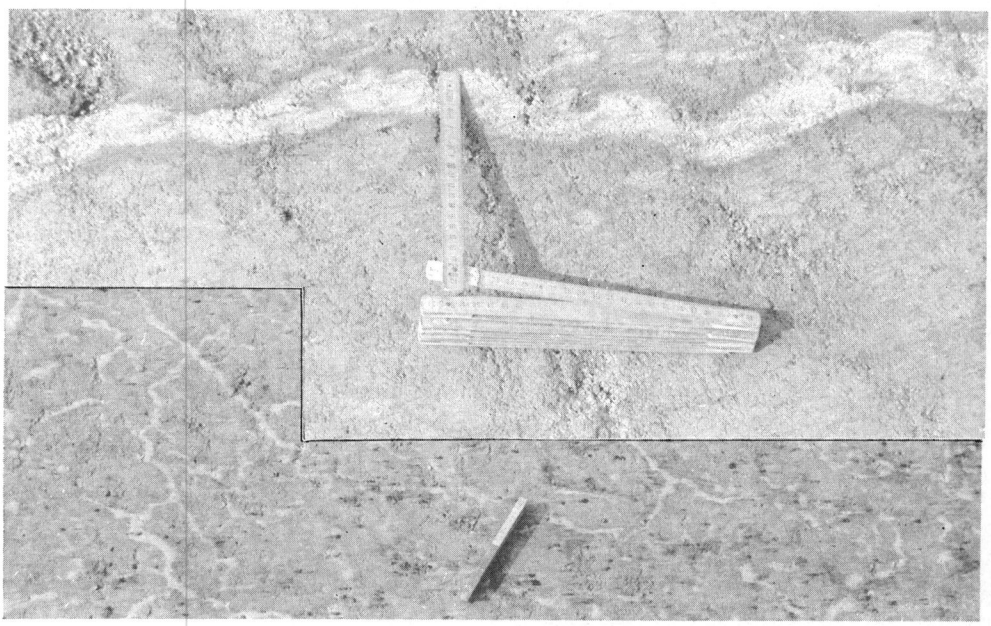


FIG. 2'. — *Sections horizontales, à 1,20 m de profondeur, du réseau de veines grises caractéristiques du plancher argileux bariolé*

Dans ce montage photographique, la partie inférieure donne l'aspect d'ensemble de l'horizon avec ses nombreuses concrétions ferrugineuses noires, tandis que la partie supérieure montre dans le détail une veine grise (plus argileuse que la matrice ocre) bordée d'une gaine ferrugineuse ocre vif.

B. — *Les sols développés sur matériaux grossiers*

Bien que présentant une faible extension à l'échelon régional (fig. 1), les dépôts grossiers n'en offrent pas moins une certaine originalité géologique et pédologique. On peut y différencier trois types de sols, suivant qu'apparaît ou non un substrat argilo-sableux et compte tenu des conditions de drainage externe. Les différenciations morphologiques et physico-chimiques observées au sein des profils résultent ici pour une bonne part d'une différenciation initiale d'origine géologique.

1° *Sols de texture grossière à profil peu différencié* (sols bruns acides).

— En Sologne bourbonnaise, les sols formés sur matériaux grossiers épais occupent des vallonnements assez doux. Parfois regroupés dans quelques secteurs (par exemple bordure de l'Acolin), ils sont le plus souvent associés d'une façon assez anarchique aux sols sur argile sableuse. Du point de vue morphologique, les profils présentent des horizons très peu contrastés, mis à part une légère ségrégation du fer en profondeur, laquelle relève souvent d'ailleurs de processus très anciens de circulation préférentielle de nappe dans certains strates du dépôt. Ce sont des sols très riches en sables (70 à 80 p. 100), sables grossiers surtout, et en éléments supérieurs à 2 mm (10 à 50 p. 100 du poids total de terre), de nature essentiellement siliceuse (quartz, silex). Les caractéristiques physico-chimiques sont liées à cette texture grossière : capacité d'échange très faible (2 à 4 mé. p. 100 g), taux de saturation généralement peu élevé par suite des très faibles réserves minérales, faible capacité de rétention pour l'eau. Ce sont des sols peu humifères, le taux de matière organique dépassant rarement 1,5 p. 100 sous culture où le rapport C/N est voisin de 10.

— Sur la rive gauche de l'Allier, la plupart des pentes associées au réseau hydrographique sont occupées par des sols du même type dont la proportion d'éléments grossiers, cailloux et graviers, est généralement plus forte ; on y observe en outre une plus grande hétérogénéité texturale. Un plancher argilo-sableux bariolé, de profondeur très irrégulière, est aussi observé dans les profils qui convergent alors vers l'un ou l'autre des types de sols décrits ci-après.

2° *Sols de texture grossière sur substratum argilo-sableux à faible profondeur* (moins de 1,20 m).

Deux cas sont ici à distinguer, suivant les conditions de station : pentes d'une part, replats et dépressions d'autre part.

— *Sols bruns faiblement lessivés sur pentes.*

Essentiellement observé en Sologne bourbonnaise, ce faciès, caractérisé par une discontinuité lithologique brutale, a donné naissance à un type de sol semblable aux précédents mais moins profond. Il repose entre 50 et 100 cm sur un niveau sablo-argileux ou argilo-sableux bariolé plus ou moins comparable morphologiquement à l'horizon argillique des sols lessivés hydromorphes.

La convergence de faciès est nette avec les sols bruns lessivés à pseudogley lorsque ce niveau bariolé apparaît vers 50 cm.

— *Planosols des replats et des dépressions* (fig. 3).

En position de replat et dans les dépressions, la même superposition de dépôts grossiers peu épais à des sables argileux ou des argiles sableuses donne des sols sableux hydromorphes à profil très différencié comprenant typiquement :

— un horizon humifère A_{11} très foncé,
— un horizon A_{12} gris clair,
— un horizon A_{2g} blanchâtre tacheté de rouille, à limite inférieure brutale,
— un plancher argilo-sableux imperméable (II B C_g).

Ces sols, à complexe très désaturé, sont très pauvres en éléments minéraux et en fer.

Les diverses caractéristiques, telles qu'elles ressortent du profil représentatif de l'unité (1), répondent précisément à la définition des Planosols à laquelle font référence diverses classifications étrangères (FAVROT et LEGROS, 1972).

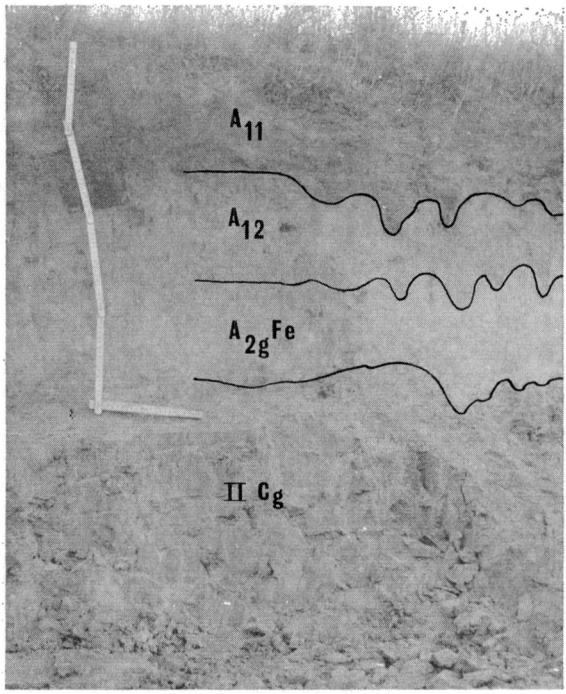


FIG. 3. — *Planosol typique sur sables et argiles du Bourbonnais*

3° *Unités complexes de sols.*

Dans de vastes secteurs vallonnés de la Sologne bourbonnaise, la mise en place de la nappe détritique a abouti à des superpositions et à des juxtapositions très anarchiques des différents matériaux depuis des argiles très pures jusqu'aux sables et graviers (fig. 1).

Les sols développés sur ces dépôts (DEWOLF, 1962) révèlent une telle hétérogénéité qu'il n'est pas possible de dégager un type dominant. Il y a passage brutal de l'une à l'autre des différentes unités décrites ci-dessus : sols bruns lessivés à pseudogley, sols bruns acides, sols bruns faiblement lessivés, voire planosols.

C. — *Principaux facteurs et processus de la pédogenèse*

La formation et l'évolution des sols aboutissant aux différentes unités définies précédemment, résultent finalement d'un nombre très limité de facteurs; la roche-mère et la topographie constituant en effet les deux principaux. Le climat (assez uniforme à l'échelon régional) et le facteur temps — puisqu'il s'agit d'une seule forma-

(1) Profil 170 en annexe.

6 - 9 : référence aux unités figurant sur le bloc diagramme

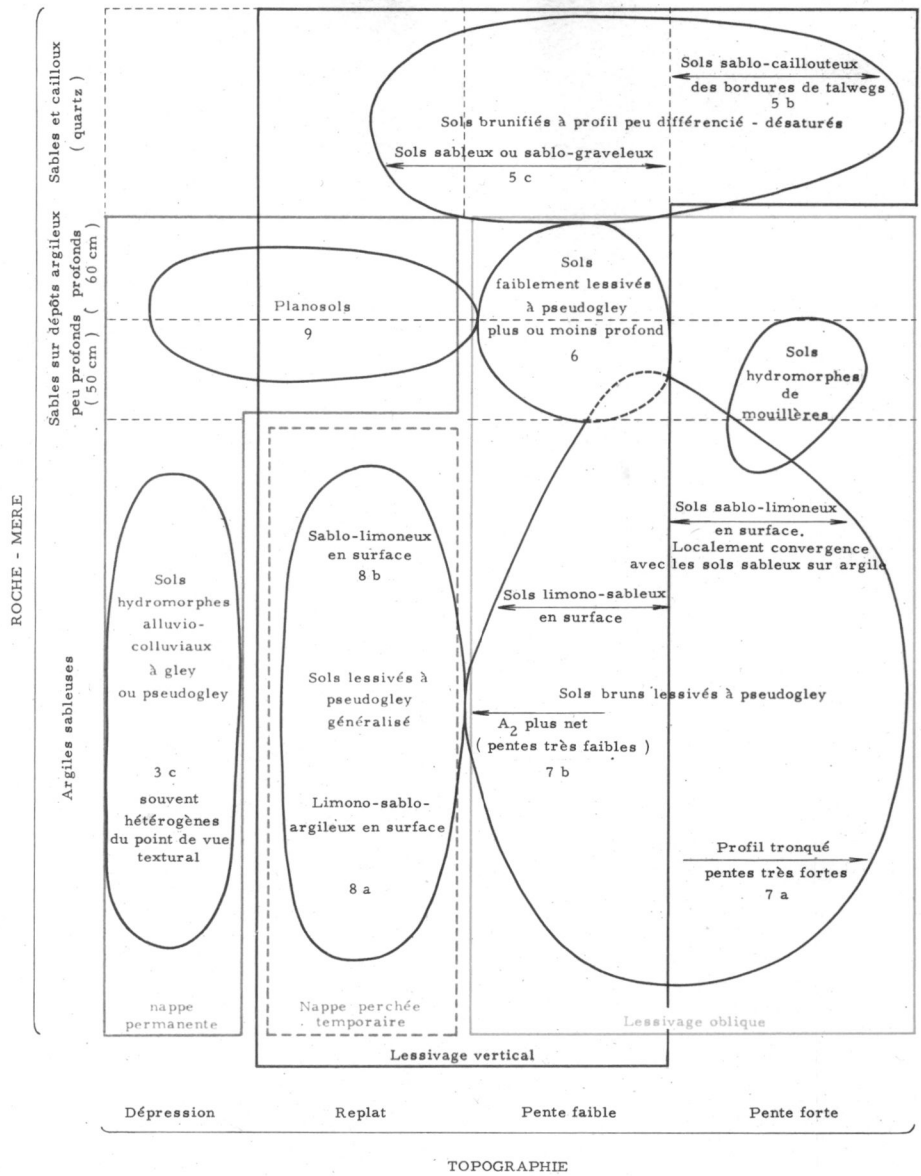


Fig 4 - SCHEMA DE L'ARTICULATION DES UNITES DE SOLS EN FONCTION DES VARIATIONS DE LA ROCHE-MERE ET DE LA TOPOGRAPHIE

tion stratigraphique, — n'interviennent pratiquement pas dans la différenciation observée. L'occupation du sol, naturelle ou agricole, joue un rôle très nuancé.

Au regard de ces facteurs, les processus de pédogenèse sont également limités, l'illuviation et l'hydromorphie — avec des variantes dans leur forme et leur intensité — étant les plus caractéristiques. Toutefois on note également, à un degré moindre, des phénomènes d'acidification et d'érosion.

Le schéma (fig. 4) [1] illustre l'articulation existant entre ces facteurs, ces processus et la distribution des sols dans le paysage. Ce dernier aspect a été souligné également dans un bloc diagramme (fig. 5) [2] représentant la répartition réelle des unités pédologiques dans la région de Dompierre-sur-Besbre, représentative du milieu bourbonnais.

1° *La roche-mère.*

Les faciès lithologiques conditionnent au premier chef la genèse des sols étudiés. Deux exemples le montrent clairement :

— Sur les dépôts de matériaux grossiers épais, la nature même de la roche-mère, essentiellement constituée de sables et graviers peu altérables, a pratiquement fixé dès l'origine l'essentiel des propriétés du sol. Celles-ci se traduisent en particulier par un profil très uniforme offrant peu d'indices d'une évolution pédologique qui est pourtant très nette à proximité sur des matériaux argileux de même âge dont la différenciation résulte d'une pédogenèse *in situ*.

— Lorsque les conditions originelles de dépôt ont amené la superposition de matériaux sableux à des argiles compactes, on observe en zones déprimées des sols hydromorphes à profil très contrasté du type planosol.

On verra de plus (III) que des variations dans la distribution du fer et de l'argile se manifestent également sur argile sableuse quand on passe d'une famille à l'autre (nappe, placages, hautes terrasses).

2° *Le relief.*

A chaque situation topographique sont associés un ou plusieurs processus qui déterminent à leur tour un type d'évolution spécifique :

— dans les dépressions, l'absence de drainage externe favorise l'hydromorphie liée à la présence d'une nappe quasi permanente. Ce phénomène conditionne en particulier la genèse des planosols quand la superposition de matériaux sableux et argileux crée une prédisposition. L'appauvrissement en fer de l'horizon A_2 découle directement, quant à lui, de l'action de cette nappe,

— sur replats ou pentes faibles, l'hydromorphie intervient encore, par suite de l'existence d'une nappe perchée temporaire ; elle est conjuguée avec des processus de lessivage vertical et d'argilification *in situ* qui semblent tout particulièrement favorisés par le climat humide,

— sur déclivités bien marquées, un phénomène de lessivage oblique par écoulement hypodermique se manifeste, conjointement à une érosion plus ou moins active. Pour les sols sur argiles sableuses cela se traduit par un appauvrissement progressif en éléments fins du premier horizon lorsque la pente augmente. Cependant, l'analyse

(1) Fig. 4, colonne de gauche (ROCHE-MÈRE) : au lieu de (50 cm) (60 cm), lire < 50 cm... > 50 cm.
(2) Clichés Atelier Offset E. N. S. A., Montpellier.

statistique montrera que la différenciation morphologique des sols sur argile sableuse en fonction de la topographie ne se retrouve pas avec netteté au niveau de toutes les données analytiques.

3° *L'occupation des sols.*

Les terres mises en culture acquièrent rapidement en surface des propriétés différentes de celles des mêmes sols maintenus sous forêt : diminution du taux de matière organique, qui se dégrade et tend vers un nouvel équilibre, corrélativement avec un abaissement du rapport C/N qui tend vers 10, une élévation du pH et du taux des réserves minérales, enfin une modification du régime hydrique naturel du fait de l'assainissement et des irrigations, etc..

4° *Conséquences sur le comportement agronomique.*

La répartition verticale du fer, son extériorisation morphologique, traduisent nettement des phénomènes d'oxydo-réduction caractéristiques d'un mauvais drainage interne du sol. L'accumulation d'argile résultant de l'illuviation et de l'argilification concourent également à cette situation et ces deux processus conditionnent finalement le comportement agronomique des sols sur argiles sableuses.

Les conséquences de ce type d'évolution sur les propriétés physiques des sols, apparaissent nettement, au travers des valeurs de la perméabilité (tabl. 2).

TABLEAU 2

Perméabilité et densité apparente des sols lessivés hydromorphes de la région de Dompierre-sur-Besbre

Sols	Caractéristiques hydrodynamiques		
	Valeurs médianes de la vitesse de filtration (méth. Vergière) (en cm/h)		Valeurs moyennes de la densité apparente
	K_2	K_3	
Sols bruns lessivés à pseudogley de pentes :			
Horizon A	7,7	4,0	1,49
Horizon B_g	2,4	1,3	1,50
Sols lessivés à pseudogley des replats :			
Horizon A	2,7	1,8	1,39
Horizon B_g	2,5	1,3	1,47

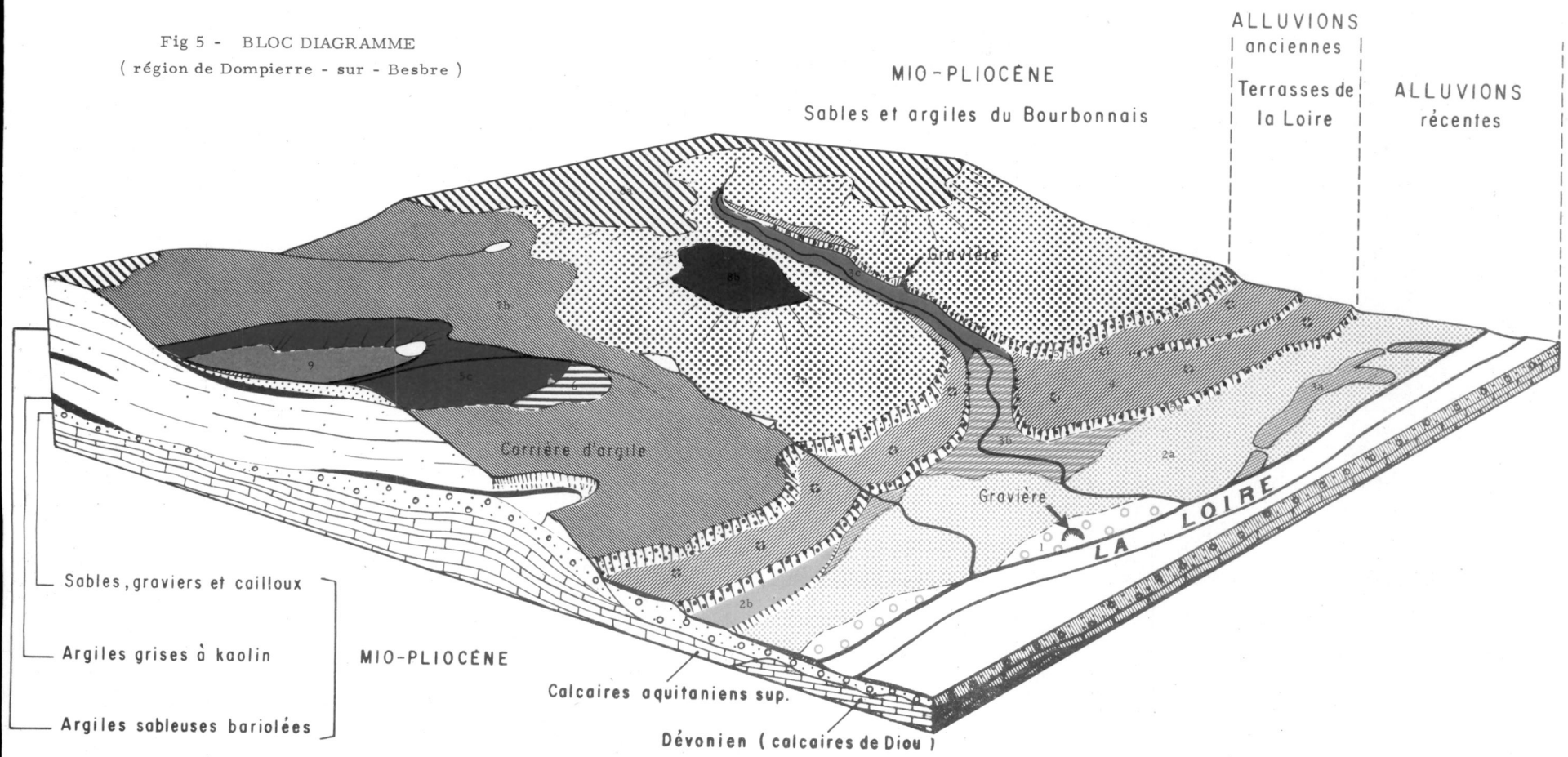
Les mesures réalisées (zone cultivée) confirment le diagnostic de terrain : les valeurs de la perméabilité sont faibles, notamment dans l'horizon argillique, elles s'abaissent nettement lorsque les conditions de saturation persistent :

$$(K_3 < K_2 \text{ avec } K_3 \neq 1{,}3 \text{ cm/h})$$

L'horizon argillique constitue en effet un écran à l'infiltration verticale des eaux et conduit à la formation de la nappe perchée temporaire.

Celle-ci ne s'élimine que très progressivement par évapotranspiration, processus

Fig 5 - BLOC DIAGRAMME
(région de Dompierre - sur - Besbre)



SOLS D'ALLUVIONS RECENTES

SOLS PEU EVOLUES D'APPORT ALLUVIAL (inondables)

1 Sol sableux, parfois caillouteux sur sables et cailloutis peu profonds

SOLS BRUNS ALLUVIAUX

2a Sol sablo-argilo-limoneux sur sables de la basse plaine de la Loire

2b Sol sablo-argilo-limoneux sur cailloutis des niveaux supérieurs d'alluvions récentes de la Loire

SOLS ALLUVIAUX HYDROMORPHES

3a Sol argilo-limono-sableux à gley et nappe permanente sur argiles puis sables, des bras morts et des gouttières de piémont

3b Sol argileux humifère à gley sur argiles bariolées vertiques (du ruisseau de Lodde)

3c Sol alluvio-colluvial à pseudogley ou à gley des fonds de talwegs

SOLS D'ALLUVIONS ANCIENNES

SOLS BRUNS LESSIVES

4 Sol sablo-limoneux, plus ou moins caillouteux, légèrement engorgé, sur limons argilo-sableux puis cailloutis des terrasses de la Loire

SOLS BRUNS ACIDES

5a Sol sablo-caillouteux à quartz dominant des talus de terrasse de la Loire

SOLS DES SABLES ET ARGILES DU BOURBONNAIS

SOLS BRUNIFIES A PROFIL PEU DIFFERENCIE

5b Sol sablo-caillouteux, très acides, à quartz et silex des bordures de talwegs

5c Sol sablo-graveleux profond des zones planes et des pentes faibles

SOLS BRUNS FAIBLEMENT LESSIVES

6 Sol sableux, des pentes faibles, à pseudogley plus ou moins profond, sur plancher argileux

SOLS BRUNS LESSIVES A PSEUDOGLEY (à horizon Bt argilo-sableux bariolé)

7a Sol sablo- limoneux brun des pentes fortes

7b Sol limono-sableux gris des pentes moyennes

SOLS LESSIVES A PSEUDOGLEY (à horizon Bt argilo-sableux bariolé)

8a Sol limono-sablo-argileux gris

8b Sol sablo-limoneux gris

PLANOSOLS

9 Sol sableux, humifère puis blanchâtre sur plancher argileux imperméable, à nappe quasi permanente - dépressions.

limité dans le contexte climatique bourbonnais, et par écoulement très lent en profondeur suivant un réseau de circulation préférentielle correspondant aux veines et traînées grises du pseudogley (horizons B_g et C_g).

— Sur replats, la richesse en limons, la faible stabilité structurale engendrent des horizons massifs peu poreux et peu perméables à l'eau. Ce phénomène s'aggrave en présence de croûtes de battance superficielles ou de semelles de labour résultant de façons culturales défectueuses. La nature de ces horizons les rend très sensibles à « l'engorgement » correspondant à une sursaturation prolongée de la porosité. Le faible drainage externe accentue également les processus d'hydromorphie et d'excès d'eau.

— Sur pentes moyennes, la nappe s'évacue plus rapidement par écoulement hypodermique à la base des horizons A, atténuant l'engorgement et l'appauvrissement de ces derniers (pas d'horizon A_{2g} net). La porosité et la perméabilité des horizons A dans les sols bruns lessivés à pseudogley est meilleure que sur replats, fait lié à la texture plus grossière.

— Sur pentes fortes, la stratification irrégulière des matériaux engendre, à l'affleurement de couches imperméables, une hydromorphie concentrée dans les mouillères, le phénomène s'accompagnant fréquemment d'une accumulation et d'un concrétionnement du fer.

Les conséquences agronomiques de ce mauvais drainage naturel sont multiples : asphyxie des semis lors d'automnes et d'hivers pluvieux, développement des maladies cryptogamiques, retards apportés aux façons culturales, dégradation de la flore des prairies, toutes conditions aboutissant finalement à une baisse du rendement et de la qualité, ainsi qu'à un resserrement de l'éventail des cultures possibles. Heureusement le phénomène n'est pas irréversible et les techniques d'assainissement en modifiant et améliorant le régime hydrique naturel, peuvent assurer aux sols de meilleures aptitudes culturales.

Compte tenu de la nature et de la localisation de l'engorgement, l'assainissement par modelé du terrain et fossés ouverts paraît être une technique bien adaptée. En créant une pente artificielle par les ados, l'évacuation des eaux superficielles — les plus néfastes — est assurée. Cela implique que le réseau de fossés et de collecteurs soit pleinement efficace, ce qui n'est pas le cas actuellement. En effet, ce système d'assainissement traditionnel dans le pays perd de son intérêt par suite des mauvaises conditions d'application : dérayures mal orientées et ne débouchant pas dans les fossés, fossés eux-mêmes colmatés, convexité irrégulière des planches, absence de collecteurs efficaces (GUITTARD, 1962).

Par suite du cheminement très lent de l'eau en surface et des risques de colmatage par les limons, le drainage souterrain est peu utilisé dans ce type de sol (surtout sur replats). Néanmoins, en enrobant des drains par des matériaux grossiers jusqu'au sommet de l'horizon argillique, en utilisant éventuellement des filtres plus serrés (pailles, tourbes), cette technique pourraît être également utilisée, associée à certaines façons culturales (sous-solage) comme cela est pratiqué en Allemagne sur des sols semblables. Une expérimentation serait souhaitable pour définir les conditions d'un tel drainage.

Le drainage-taupe, compte tenu de la faible stabilité structurale des sols lessivés hydromorphes, n'est pas assuré d'une longévité suffisante pour rentabiliser les interventions.

En tout état de cause, l'assainissement sera utilement complété par une rotation avec retour fréquent de la prairie (ray-grass d'Italie), par des apports humiques, enfin par toutes les techniques culturales améliorant la structure et donc la perméabilité du sol.

Autre conséquence de l'évolution pédologique climacique, les sols du Bourbonnais, dans leur ensemble, sont fortement désaturés et dépourvus d'éléments minéraux nutritifs. Cela implique au plan agronomique un gros effort de fertilisation, avec fumures de fond, amendements calciques et humiques importants.

III. — DISTRIBUTION DE L'ARGILE ET DU FER. SIGNIFICATION ET DISCUSSION

A. — *Remarques préliminaires*

Pour mieux définir les sols lessivés et hydromorphes, il nous a paru intéressant d'étudier dans le détail le comportement de l'argile et du fer. Il s'agit pour ces deux éléments d'obtenir une caractérisation fine portant sur un triple plan :

— détermination de valeurs moyennes,
— calcul d'intervalles de variation,
— recherches des liaisons éventuelles entre l'un et l'autre.

On peut espérer par là, dégager avec précision de l'ensemble des observations et des analyses, la définition du sol lessivé à pseudogley, typique de la formation bourbonnaise.

Mais, de plus, nous nous proposons de mettre en évidence pour ces sols, un certain nombre de propriétés dont l'analyse et l'interprétation débouchent sur les problèmes de pédogenèse.

Enfin, nous chercherons à déterminer dans quelle mesure les interprétations de laboratoire sont en concordance avec le diagnostic de terrain.

B. — *Méthodologie*

L'importance de la surface cartographiée (plusieurs milliers de km²), le nombre des profils-types analysés (115 profils, soit 571 échantillons) autorisent le recours aux méthodes statistiques. Celles-ci porteront sur les caractéristiques suivantes (1) : teneurs en argile, en fer libre et en fer total, « indices d'entraînement » du fer et de l'argile, « taux de libération » du fer.

Nous avons montré, dans la première partie, l'importance du rôle joué par la roche-mère dans la genèse des sols. Il nous a donc semblé logique et prudent de chercher à déterminer si des nuances d'origine géologique ne se traduisaient pas, à l'intérieur même des sols sur argiles bariolées par des différences sensibles de pédogenèse, matérialisées par des valeurs différentes des indices pédogénétiques (taux de libéra-

(1) Les analyses ont été effectuées selon des protocoles classiques : sédimentation et pipetage (pipette Robinson) pour l'argile, extraction à la dithionite pour le fer « libre », extraction chlorhydrique à chaud pour le fer « total ».

tion du fer et indice d'entraînement). C'est pourquoi nous avons, dans tous les cas, distingué les quatre familles de sols mises en évidence par la cartographie et correspondant aux faciès suivants :

— nappe détritique mio-pliocène (Bocage et Sologne bourbonnais),
— placages sur argiles et grès permiens (bassin de Bourbon-l'Archambaut),
— placages sur roches cristallines (Combraille bourbonnaise),
— alluvions plioquaternaires des hautes terrasses de l'Allier.

Et, pour tenter de vérifier par ailleurs le rôle joué par la topographie — rôle dont nous avons souligné également l'importance — nous avons, pour chacun de ces quatre faciès, distingué les sols des replats et les sols des pentes.

Nous avons donc, pour chaque caractéristique envisagée, étudié 8 « échantillons », la moyenne étant retenue comme caractéristique de valeur centrale et, suivant les cas, la variance, l'écart-type, le coefficient de variation ou la fourchette (calculée pour $P = 0{,}05$) comme caractéristique de dispersion.

L'analyse de variance a été le plus souvent utilisée pour tester l'influence de la topographie et de la roche-mère, les valeurs étant regroupées lorsque cette influence ne se traduit pas par des différences significatives. Les résultats présentés sont donc ceux pour lesquels on a établi qu'ils étaient statistiquement différents à $P = 0{,}05$.

L'analyse de covariance (DUBOS, 1971) a été utilisée pour comparer les droites de régression reliant les teneurs en argile et fer total.

Un certain nombre de difficultés sont apparues :

1° Dans plusieurs profils, l'analyse granulométrique a été effectuée mais pas l'analyse du fer. Nous n'avons pas voulu abandonner la quantité d'information que représentaient ces profils et l'échantillon relatif à l'argile est plus important, donc différent de celui qui a servi à établir les calculs concernant le fer.

2° Les fluctuations enregistrées autour des valeurs moyennes sont importantes dans beaucoup de cas (coefficient de variation souvent égal à 30 p. 100. Or, pour beaucoup de tests statistiques que nous avons effectués, la taille de l'échantillon est telle que le seuil de signification n'est pas atteint tout à fait.

3° Le matériau pédologique étudié crée quant à lui un certain nombre de difficultés.

L'horizon B_t, reconnu sur le terrain (revêtements, structure) n'est pas toujours le plus riche en argile, en fer total ou en fer libre, indépendamment, bien sûr, de toute hétérogénéité d'ordre géologique :

— 30 p. 100 des profils ne présentent pas, avant 1,20 m, de maxima ou de « ventres » pour l'argile ou pour le fer total ;
— 50 p. 100 des profils ne présentent pas, dans les mêmes conditions de profondeur, de ventres pour le fer libre ;
— les maxima, lorsqu'ils existent pour l'argile et pour le fer libre ne correspondent pas toujours au même horizon du profil.

Remarque 1 : Il apparaît que le décalage des maxima s'observe surtout sur les placages et les terrasses alluviales, le maximum de fer étant le plus souvent situé au-*dessus* du maximum d'argile.

TABLEAU 3

Position du maximum de fer libre par rapport au maximum d'argile
(fréquences relatives)

	Situé au même niveau	Situé plus haut	Situé plus bas
Nappe mio-pliocène	37	10	9
Placages sur plateaux cristallins	8	5	—
Placages sur Permien....	5	6	—
Hautes terrasses	9	9	2
Total %	59	30	11

Dans ces conditions, nous avons, dans la plupart des cas, procédé comme suit : si un ventre existe dans le profil, l'horizon correspondant est celui qui sert au calcul. En l'absence de ventre, l'horizon illuvial pris en compte est le B morphologique décrit sur le terrain. Ce n'est donc pas nécessairement le plus riche ou le plus profond.

Cependant pour le tableau 4 des teneurs moyennes (ci-dessous), les horizons pris en compte sont toujours les horizons morphologiques.

Remarque 2 : Lorsqu'on effectue tous les calculs d'indice d'entraînement en prenant comme horizons B les horizons les plus riches, la valeur trouvée pour ces indices est augmentée au dénominateur de 0,5 points aussi bien pour l'argile que pour le fer. Les conclusions relatives aux comparaisons des indices ne sont pas changées.

4° Par ailleurs, les conditions d'échantillonnage risquent d'introduire des erreurs systématiques par l'élimination de certaines concrétions ferro-manganiques supérieures à 2 mm ou par l'absence de prélèvement dans les niveaux aliotiques, conditions qui faussent un peu l'appréciation de la teneur moyenne des matériaux en fer.

C. — *Principaux résultats*

1° *Teneurs moyennes en argile et fer. Marges de variation.*

Le tableau 4 rend compte de ces valeurs horizon par horizon, en fonction de la position topographique (pente — replat) et des faciès de roche-mère (nappe détritique, placages, alluvions de hautes terrasses).

La séparation d'ordre stratigraphique existant entre les hautes terrasses et les trois autres formations apparaît normalement dans les teneurs absolues en fer et en argile.

Il faut, par ailleurs, noter une nette similitude granulométrique entre les sols des placages et ceux de la nappe mio-pliocène. On remarquera aussi pour ces formations que, par rapport aux sols de pente, les sols de replat ont des teneurs en argile systé-

matiquement plus faibles en A mais plus élevées en B — indice possible d'un degré d'évolution plus élevé.

En ce qui concerne le fer, les valeurs observées en sols de placages sur roches cristallines sont relativement élevées et se rapprochent de celles des sols de terrasses, la dispersion des valeurs étant plus importante pour cet élément que pour l'argile entre les différentes familles de sols considérées.

TABLEAU 4

	Nappe mio-pliocène			Placages sur plateaux cristallins			Placages sur Permien			Alluvions des hautes terrasses de l'Allier		
	A	Fe T.	Fe L.	A	Fe T.	Fe L.	A	Fe T.	Fe L.	A	Fe T.	Fe L.
Plat ...	10,5	0,87	0,57	12,7	1,64	1,0	11,0	1,34	1,00	16,4	1,77	1,08
A_1												
Pente .	12,2	1,10	0,63	13,7			12,1			16,8		
Plat ...	16,0	1,26	0,83	17,5	2,30	1,50	13,5	1,16	0,97	20,9	1,87	1,37
A_2												
Pente .	14,7	1,20	0,75	14,3			13,0	1,21	0,81	16,7		
Plat ...	31,9	2,56	1,59	31,2	3,27	2,16	30,0	2,25	1,68	44,7	3,96	2,26
B_g												
Pente .	29,9	2,20	1,30	34,8			23,6	2,10	1,02	29,4		
Plat ...	33,0	2,50	1,60	10,7	2,96	1,25	29,2	2,30	1,66	33,3	4,10	1,47
C_g												
Pente .	22,2	2,20	1,50	9,8			22,3	1,93	0,77	22,0		

A = argile. Fe T. = fer total. Fe L. = fer libre (p. 100 de terre fine).

TABLEAU 5

Valeurs moyennes des coefficients de variation

(Sols des replats)

	Nappe mio-pliocène	Placages sur plateaux cristallins	Placages sur Permien	Alluvions des hautes terrasses
Argile	26	24	31	57
Fer total et fer libre	34			

Pour les valeurs précédentes, les écarts-types sont importants (cf. tabl. 5 des coefficients de variation). L'analyse de variance montre que la dispersion ne dépend pas spécialement de la roche-mère, du type d'horizon ou de la caractéristique analy-

sée, sauf en ce qui concerne l'argile. Pour celle-ci, la nature de la roche intervient, de grandes variations étant observées sur terrasses, ce qui traduit la plus grande hétérogénéité initiale des dépôts alluviaux.

Ces valeurs sont comparables à celles trouvées par d'autres auteurs (BALL et WILLIAMS, 1968) et tendent à montrer une certaine hétérogénéité de l'unité cartographique.

2° *Variation du « taux de libération » du fer en fonction des horizons, de la roche-mère et de la position topographique.*

Le taux de libération du fer, exprimé par le rapport $\frac{\text{Fer libre}}{\text{Fer total}} \times 100$ a été calculé pour les divers horizons A_1, A_2, B_g et C_g de 67 profils.

Il n'apparaît pas statistiquement (tabl. 6) de différences significatives entre les taux de libération du fer dans les divers horizons des sols de la nappe mio-pliocène autour d'une moyenne de 64 p. 100, aussi bien sur replats que sur pentes. Il n'en va pas de même pour les autres formations où l'influence du type d'horizon est nette en position de replat. On notera que, sur pentes, les écarts ne sont pas significatifs entre horizons et qu'il existe d'autre part une certaine similitude des valeurs globales correspondant à chaque roche-mère.

TABLEAU 6

Valeurs moyennes du taux de libération du fer (en p. 100)

	Nappe mio-pliocène		Placages sur plateaux cristallins		Placages sur Permien		Alluvions des hautes terrasses	
	replat	pente	replat	pente	replat	pente	replat	pente
A_1	64		70	66	74	57	57	58
A_{2g}			65		77		61	
B_g			55		65		58	
C_g			36		62		43	
Nombre d'horizons analysés	138		16	16	19	11	28	14

Pour les sols de placages, ou réputés tels, en position subhorizontale, la nette diminution du rapport fer libre/fer total avec la profondeur peut s'interpréter comme la traduction d'une évolution qui s'effectue parfois en place avec altération et différenciation croissante du profil de la base vers le sommet. Sur pentes on peut penser que le phénomène est masqué par une plus grande hétérogénéité due à l'érosion dans les parties hautes et au colluvionnement dans les parties basses.

3° *Indices d'entraînement du fer libre et de l'argile.*

Ces indices désignent les rapports $\frac{\text{teneur en fer (ou argile) de } A_1}{\text{teneur en fer (ou argile) de } B_g} \times 100$ compte tenu des remarques faites précédemment quant à la disparité pouvant exister entre le diagnostic morphologique de l'horizon B_g et sa caractérisation analytique.

Indice d'entraînement de l'argile.

Les fluctuations enregistrées autour des valeurs moyennes sont telles que l'influence de la topographie n'apparaît pas statistiquement, quelle que soit la roche-mère, en dépit de ce qu'on a pu constater sur le terrain. Réciproquement, l'influence de la roche-mère n'apparaît pas, quelle que soit la position topographique.

Cependant, si on réunit les échantillons « sur replats » et « sur pentes » pour chaque roche, l'influence de cette dernière apparaît tout juste significative à $P = 0{,}05$ (l'augmentation de la taille de l'échantillon permettant alors d'accroître le nombre de degrés de liberté servant à calculer la variance résiduelle). La roche-mère explique dans ces conditions 10 p. 100 de la variation de l'indice. En définitive on peut retenir les valeurs suivantes :

TABLEAU 7

	Nappe mio-pliocène	Placages sur cristallin	Placages sur Permien	Hautes terrasses
Échantillons	71	15	10	14
Indice	$\frac{1}{3{,}33 \pm 0{,}20}$	$\frac{1}{2{,}74 \pm 0{,}20}$	$\frac{1}{2{,}83 \pm 0{,}20}$	$\frac{1}{2{,}64 \pm 0{,}20}$

0,20 étant la fourchette commune calculée à $P = 0{,}05$ à partir de la fluctuation résiduelle.

Le fer : ni la topographie ni la roche ne jouent un rôle quelconque dans la fluctuation des indices d'entraînement du fer libre. En définitive, cet indice est égal à :

$$\frac{1}{2{,}68 \pm 0{,}28}$$

Comparaison des indices d'entraînement du fer et de l'argile.

Si l'on considère chacune des huit combinaisons associant une roche-mère et une position topographique donnée, aucune différence significative n'apparaît entre les deux indices ; si l'on regroupe replats et pentes, seuls les sols de la nappe mio-pliocène présentent une différence juste significative à $P = 0{,}05$ entre les deux indices dont les valeurs moyennes sont respectivement :

$$\frac{1}{3{,}33 \pm 0{,}20} \text{ pour l'argile et } \frac{1}{2{,}90 \pm 0{,}28} \text{ pour le fer libre}$$

TABLEAU 8

Analyse minéralogique du profil 113

Horizon	Terre fine	Sables > 50 µ
A_{11} (3-11 cm)	kaolinite, illite +++ vermiculite + quartz, feldspaths	quartz +++ feldspaths ++
B_g (50-70 cm)	kaolinite, illite +++ interstratifiés quartz, feldspaths (traces)	*id.*
C_g (110-130 cm)	kaolinite illite chlorite (trace) quartz, feldspaths	*id.*

TABLEAU 9

Analyse des éléments totaux (profil 113)

Horizons	Sables totaux (> 50 µ) p. 100 de la terre fine	Quartz (%)		Silice des silicates		Silice totale (%)		Al_2O_3 (%)		Fe_2O_3 (%)	
		Tf	S	Tf	S	Tf	S	Tf	S	Tf	S
A_{11} (3-11 cm)	58,5	88,3	91,3	3,3	1,6	91,6	92,8	2,3	1,0	1,2	0,6
A_{12} (11-23)	59,6	89,8	94,1	0,6	1,7	90,4	95,8	2,4	1,1	1,4	1,0
A_{2g} (23-35)	55,5	86,8	92,6	7,9	1,9	94,7	94,5	3,2	1,5	2,2	2,4
B_{1g} (35-50)	43,0	75,2	81,9	17,5	5,8	92,7	87,7	5,8	4,0	3,9	2,9
B_{21g} (50-70)	29,5	52,6	59,3	25,4	5,5	78,0	64,8	9,9	8,4	5,2	3,4
B_{22g} (70-110)	29,0	51,9	77,8	32,7	8,4	84,6	86,1	10,9	5,3	5,3	2,7
C_g (110-130)	34,5	56,3	80,6	25,9	7,0	82,2	87,6	9,7	4,5	4,9	2,5

Tf = résultat p. 100 de terre fine.
S = résultat p. 100 des sables totaux (> 50 µ).

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ce léger écart :

— entraînement du fer et de l'argile dans le même rapport, mais perte de fer par entraînement oblique — ce que semblent contredire les valeurs du taux de libération du fer dans chaque horizon;

— effets conjugués, dans l'horizon B_g, de la migration d'argile et d'une argilification *in situ*, ce qui paraît en accord avec les analyses minéralogiques et les déterminations d'éléments totaux rapportées ci-après pour un profil type (tabl. 8 et 9).

L'examen micromorphologique révèle par ailleurs certains types de séparations plasmiques pouvant effectivement traduire une argilification *in situ* des feldspaths.

4° *Relations argile-fer total.*

L'examen des résultats analytiques pour l'ensemble des profils étudiés suggérait une relation possible entre argile et fer — en dépit de variations, somme toute assez faibles, évoquées ci-dessus. La représentation graphique a fait apparaître une certaine linéarité de la liaison entre les couples argile-fer total, indépendamment du type d'horizon. Les droites de régression ont donc été calculées pour les 8 « échantillons » de base (2 situations topographiques × 4 faciès de roches-mères). L'influence de la topographie n'apparaissant pas, on a obtenu après regroupement des données :

	Nappe mio-pliocène	Placages sur cristallin	Placages sur Permien	Hautes terrasses
	$A = 9{,}6\ Fe_t + 3{,}6$	$A = 4{,}5\ Fe_t + 7{,}2$	$A = 9{,}4\ Fe_t + 3{,}9$	$A = 7{,}0\ Fe_t + 8{,}8$
r	0,80	0,50	0,65	0,53 (1)
n	189	54	59	35

(1) Sur replats seulement (non significatif sur pentes).
A = Argile p. 100 de terre fine.
Fe_t = Fer total p. 100 de terre fine.

Le fer et l'argile ont donc un comportement assez semblable même s'ils migrent séparément. Ceci ne contredit pas le fait que les indices d'entraînement du fer et d'argile sont parfois différents : il s'agit en effet de liaisons stochastiques, approximatives et moins discriminantes que des comparaisons de moyennes. Des liaisons de même type peuvent être observées entre fer libre et argile, mais les coefficients de corrélation sont systématiquement moins élevés qu'avec le fer total.

Un calcul effectué horizon par horizon sur replats et pentes de la nappe mio-pliocène montre que les coefficients de corrélation sont plus élevés sur replats, aussi bien en A_1 qu'en B_g. Les différences relevées entre replats et pentes pourraient exprimer l'effet d'une « pédogenèse latérale » affectant sélectivement le fer : on constate en effet sur pente la présence de nombreuses mouillères aux eaux très ferrugineuses.

En A_1 : $A = 4{,}8\ Fe_t + 5{,}7$ $\quad r = 0{,}72$ significatif à $P = 0{,}01$ $(n = 39)$

se décompose en $\begin{cases} A = 5{,}8\ Fe_t + 5{,}0 & r = 0{,}80 \text{ replat} \\ A = 3{,}8\ Fe_t + 6{,}5 & r = 0{,}60 \text{ pente} \end{cases}$

En B_g : $A = 4{,}1\ Fe_t + 20{,}7$ $\quad r = 0{,}49$ significatif à $P = 0{,}01$ $(n = 39)$

se décompose en $\begin{cases} A = 3{,}8\ Fe_t + 22{,}0 & r = 0{,}50 \text{ replat} \\ A = 3{,}8\ Fe_t + 19{,}7 & r = 0{,}36 \text{ pente} \end{cases}$

Quoi qu'il en soit, l'examen statistique des données montre l'existence entre les valeurs globales de fer total et d'argile, d'une relation qui ne ressort pas nettement du simple examen morphologique des sols.

D. — *Observations récapitulatives*

Les sols lessivés hydromorphes du Bourbonnais, caractéristiques du groupe au point de vue morphologique, se définissent globalement par un ensemble de valeurs statistiques que l'on peut résumer comme suit, en se référant à la famille des sols sur nappe mio-pliocène qui apparaît comme la plus représentée et la plus typique :

Taux de libération du fer voisin de 0,64

Indice d'entraînement de l'argile $\dfrac{1}{3{,}33 \pm 0{,}20}$

Indice d'entraînement du fer $\dfrac{1}{2{,}90 \pm 0{,}28}$

Relation argile — fer total : A p. 100 = 9,6 Fe_t p. 100 + 3,6

en remarquant toutefois que les chiffres trouvés seraient voisins des normes attribuées dans la classification au *sous-groupe lessivé faiblement podzolique.*

L'approche statistique a mis l'accent sur certains points : ainsi, on a pu mettre en évidence la relative hétérogénéité des « zones homogènes » correspondant aux unités cartographiques et par exemple, la difficulté d'observer des horizons B qui réunissent les caractères morphologiques et analytiques du B argillique, avec coïncidence des maxima d'argile et de fer. De même, l'influence du facteur topographie, apparemment évidente sur le terrain, ne joue qu'épisodiquement sur le taux de libération du fer ou la corrélation argile-fer total par exemple ; elle s'exerce dans d'autres directions : couleur plus claire des horizons A sur replat, liée davantage à une hydromorphie accusée qu'au processus d'illuviation.

Les comportements respectifs de l'argile et du fer montrent que la différenciation des profils résulte d'une évolution *in situ*, y compris dans le cas où le matériau est hétérogène au départ (hautes terrasses). L'évolution parallèle de l'argile et du fer est d'ailleurs matérialisée par une corrélation linéaire. Toutefois l'hétérogénéité plus grande des sols de pente crée, au niveau du traitement statistique, un certain nombre de difficultés compliquant l'interprétation des résultats.

Les variations observées sont minimes et montrent que les matériaux de la nappe détritique mio-pliocène et ceux des placages ont même origine. Toutefois les placages sont plus proches des zones cristallines d'ablation et correspondent alors à des matériaux moins altérés, car plus riches en feldspaths et en micas. En ce qui concerne les sols, le taux de libération du fer traduit cette évolution moindre, qui peut être liée dans certains cas à des processus de remaniements. Les alluvions des hautes terrasses, quant à elles, se différencient nettement des autres formations, ce fait étant

lié à la fois à l'époque, à la nature et aux conditions de mise en place des matériaux.

L'interprétation de certaines données pose le problème de l'importance relative du lessivage parmi les processus de pédogenèse de ces sols.

Celui-ci peut en effet :

— se superposer à l'argilification *in situ* — et l'on constate alors l'existence d'un ventre d'argile,

— interférer avec un appauvrissement des horizons A_1 et A_2 lié à des phénomènes d'hydromorphie et de circulation oblique (cas des profils sans « ventre » en particulier).

Dans ces conditions, la notion d'« indice d'entraînement » intègre en fait les effets conjugués d'un ensemble de processus.

CONCLUSION

Dans cet essai de synthèse de différentes études pédologiques réalisées en Bourbonnais, nous nous sommes efforcés d'apporter une contribution, sur un plan plus général, à la connaissance des conditions de pédogenèse sur roche-mère détritique et d'autre part à la caractérisation d'un groupe de sols extrêmement répandu en France et ailleurs, celui des sols lessivés hydromorphes.

Pour cela, nous n'avons pas voulu dissocier l'exploitation statistique de résultats analytiques des observations morphologiques très nombreuses — résultant de l'étude ponctuelle sur profils et des données ou renseignements relatifs à l'environnement naturel, fournis par la cartographie.

Nous nous sommes efforcés d'augmenter notre connaissance globale du milieu en établissant des relations qui confirment et traduisent en langage quantitatif des observations de terrain et qui permettent également de formuler un certain nombre d'hypothèses relatives à la pédogenèse.

Ainsi, en Bourbonnais, la roche-mère et le relief semblent être les facteurs essentiels de l'évolution des sols. Ils déterminent en effet la présence côte à côte de sols « azonaux », polygéniques, sur matériaux grossiers, et de sols lessivés hydromorphes formés *in situ* à partir d'argiles sableuses, en accord avec le climat régional. Sur les dépôts sableux ou sablo-graveleux de la nappe mio-pliocène se développent :

— en position de pente, des sols à profil très peu différencié dont la texture grossière et la nature quartzeuse n'ont pas permis l'extériorisation de l'évolution climacique (sols bruns acides),

— dans les dépressions, des sols désaturés à profil très contrasté dont la genèse est commandée par la quasi-permanence d'une nappe perchée et par la superposition brutale de matériaux sableux sur un plancher argileux imperméable (planosols).

Enfin, sur les dépôts argilo-sableux se sont différenciés des sols bruns lessivés à pseudogley sur les pentes, des sols lessivés à pseudogley sur les replats. Les premiers ont des caractéristiques physico-chimiques légèrement variables en surface et sont soumis à une pédogenèse oblique non négligeable ; les seconds, dont les propriétés restent remarquablement constantes, présentent un horizon A_{2g} très net, lié pour une

grande part à l'hydromorphie (nappe perchée temporaire). Les dynamiques du fer et de l'argile révèlent des points communs tant sur le plan de la distribution verticale que sur leurs proportions réciproques dans un horizon donné, tout en faisant apparaître dans une certaine mesure l'influence de la topographie et du faciès de la roche-mère au niveau de la caractérisation analytique du sol.

Le comportement agronomique découle directement de ce type d'évolution : les sols sur argiles sont en effet très peu perméables en surface et l'assainissement (modelé du terrain et fossés ouverts) constitue l'aménagement prioritaire de leur mise en valeur. La très grande désaturation de l'ensemble des sols de la nappe détritique implique également un gros effort de fertilisation.

Reçu pour publication en septembre 1972.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO INVESTIGATION OF THE DETRITAL SHEET IN THE BOURBONNAIS (IN FRANCE)

North of the « Massif central », in France, the sands and clays of the Bourbonnais area extend over a large detrital sheet originated from the surrounding crystalline relief.

The clay deposits have given rise to desaturated soils of A-B_g-C_g profiles, schematically distributed as leached pseudogley soils in flat uplands and grey-brown podzolic soils on slopes.

On sandy deposits, depending on the topographical location, either uniform or contrasting profiles of the planosol type, came about.

Both ground survey and soil analysis clearly show how deeply topography and parent rock affected the pedogenetic processes and hence, the agricultural implications of such factors.

A configurational pattern sets out in broad outlines the main pedological features and a statistical interpretation of these enables to characterize them and establish the relationships, occasionally evincing very close connections between the dynamics of iron and clay, respectively.

Such connections are discussed in relation with four types of parent rock and two types of topographical locations.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER BÖDEN DES DETRITISCHEN SCHICHTS IN DER REGION BOURBONNAIS

Nördlich des zentralen französischen Gebirgstockes (Massif central) bilden die « Sande und Tone des Bourbonnais » eine ausgedehnte Decke, die vom den angrenzenden kristallinischen Reliefen abstammt.

Die « Tone » haben entsättigten Bodenprofile A-B_g-C_g verursacht mit schematischer Verteilung unter ausgelaugten Pseudogleyböden (auf Geländefalten) und ausgelaugten braunen Pseudo. gleyböden (auf Anhängen).

Je nach der topographischen Stellung, haben sich auf den « Sanden » Böden mit gleichförmigem Profil, oder Böden mit Scharf abgesetztem Profil des Typus Planosol entwickelt.

Die Untersuchung des Bodens und die analytische Annäherung heben die Rolle der Topographie und des Muttergesteins bei den Bodenbildungsvogängen hervor (und infolgedessen die landwirtschaftlichen Zwischenfälle dieser Faktoren).

Um die Haupteigenschaften der regionalen Bodenbildung herauszustellen wird ein Gliederungsschema der grossen pedologischen Einheiten vorgeschlagen. Die statistische Darstellung der

analytischen Angaben erlaubt es, diese grossen Einheiten zu charakterisieren und Beziehungen aufzustellen, die manchmal sehr enge Zusammenhänge zwischen der Dynamik des Eisens und der des Tones erscheinen lassen.

Diese Zusammenhänge werden je nach den vier Muttergesteinstypen und zwei Typen topographischer Stellungen diskutiert.

РЕЗЮМЕ

К изучению почв обломочного слоя Бурбонне.

Ж. К. ФАВРО, Ж. П. ЛЕГРО, М. ДЮПОН.

В северной части Центрального Массива « Пески и Глины района Бурбонне» образуют обломочный покров происходящий от кристаллических рельефов окаймления.

« Глины» образовали почвы рассыщенных профилей A — Bg — Cg, которые можно схематически разделить на выщелоченные почвы с псевдоглеем (на ровных местах), и выщелоченные коричневые почвы с псевдоглеем (на склонах).

На « песках», в зависимости от их топографического расположения, сформировались почвы с однородным профилем, или почвы с противуположными профилями, типа планосолей.

Аналитическое изучение местности выявляет роль топографии и материнской породы в почвообразовательных процессах (и в будущем влияния этих факторов на агрономические последствия).

Для выделения общих черт местного почвообразования предлагается схема сочленений главных педологических единиц. Статистическая обработка данных анализа позволяет охарактеризовать эти главные единицы и определить их взаимоотношения с помощью выявления, часто очень тесных всязей, между динамикой глины и динамикой железа.

Проводится обсуждение этих связей, в зависимости от четырех типов материнских пород и двух типов топографического расположения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALL D. F., WILLIAMS W. M., 1968. Variability of soil chemical properties in two uncultivated brown earths. *J. Soil Sci.*, **19**, 2, 379-391.

BONFILS P., SERVAT, E. 1963. Étude pédologique entre Loire et Allier. Communes de Magny-Cours et Saincaize (Nièvre). *S. E. S., I. N. R. A.*, nº 18, 25 p.

BONFILS P., LABAU G., 1969. Étude pédologique du Canton de Cérilly (Allier). *S. E. S., I. N. R. A.* nº 109, 107 p.

BORNAND M., CALLOT G., FAVROT J.-C., SERVAT E., 1968. Les sols du Val d'Allier. *S. E. S., I. N. R. A.*, nº 100, Louis JEAN, Gap, 199 p.

DANGEARD L., 1963. Quelques observations sur le Tertiaire de la Limagne bourbonnaise. *B. S. G. F.*, 5e série, III, 381-384.

DEFFONTAINES J.-P., GRAS R., 1968. Les facteurs techniques de la production de la pêche tardive en moyen Vivarais. *Ann. agron.*, **19**, 1, 5-51.

DELAUNAY L., 1923. Notes sur les terrains tertiaires de la Limagne bourbonnaise. *B. S. G. F.*, XXVI, 147, 192 p.

DERRUAU M., 1949. *La morphogenèse de la Grande Limagne et ses conséquences sur la morphologie des grands plateaux bordiers.* Allier. Impr. Grenoble, 181 p.

DEWOLF Y., 1962. Étude des problèmes posés par la formation dite des sables et argiles du Bourbonnais. *Bull. A. F. E. S.*, 6-7, 337-342.

DUBOS J., 1971. *Liaisons stochastiques en économie.* 1 vol., 488 p. Dunod, Paris.

DUCHAUFOUR Ph., LELONG G., 1967. Entraînement ou destruction d'argile dans les horizons éluviaux des sols lessivés. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **264**, 2884-2887.

FAVROT J.-C., 1969. Les sols des terrasses de l'Isle dans la région de Mussidan (Dordogne). Remarque sur les sols lessivés. *Bull. A. F. E. S.*, **3**, 21-36.

FAVROT J.-C., 1969. *Notice explicative de la carte pédologique de Vichy au 1/100 000.* Service d'Étude des Sols et de la Carte pédologique de France, C. N. R. A., 78 - Versailles, 158 p.

FAVROT J. C., LEGROS J. P., 1972. A propos d'un type de sol hydromorphe observé en France : Le Planosol lithomorphe. *Bull. A. F. E. S.* (à paraître).

GUITTARD M., 1962. L'amélioration foncière des sols de Sologne bourbonnaise. *Bull. A. F. E. S.*, **7**, 362-366.

JUNG J., 1946. *Géologie de l'Auvergne et de ses confins bourbonnais et limousins.* Impr. Nle. Paris, 372 p.

LEGROS J.-P., BOYER G., 1969. Étude pédologique du Canton de Dompierre-sur-Besbre (Allier). *S. E. S., I. N. R. A.*, nº 108, 180 p.

LOUDYI B., 1969. *Caractérisation granulométrique et analyses chimiques de quelques sols développés sur matériaux mio-pliocènes en Sologne bourbonnaise.* D. E. A., Fac. Sciences, Montpellier.

MARTIN M., 1962. Aspect agricole de la Sologne bourbonnaise. *Bull. A. F. E. S.*, 7, 356-361.

PLAISANCE G., 1953. Observations sur les sous-sols marmoroïdes de certains sols de limons. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **236**, 25, 2435-2437.

SERVANT J., 1966. Étude pédologique du Canton de Chantelle (Allier). *S. E. S., I. N. R. A.*, nº 50, 53 p.

ANNEXES

Sol brun lessivé à pseudogley. Profil 33

Localisation : Monetay (Allier) (12 km, S.-O. de Digoin) — Date : 6-7-1968
Topographie : Pente faible — 3° 51′ E.
Végétation : Prairie de fauche — 46° 25′ N.
Matériau originel : Argile mio-pliocène — Z = 280 m

A_{p1} 0-10 cm : Frais. 10 YR 4/3 humide : brun foncé. Peu humifère. Texture de sable limoneux à sable quartzeux. Structure grumeleuse moyenne, nette, localisée dans le chevelu racinaire très dense. Poreux. Friable. Transition nette, régulière.

A_{p2} 10-35 cm : Frais. 10 YR 5/4 humide : brun jaune. Peu humifère. Quelques concrétions noires, dures, ferrugineuses. Texture de sable limoneux. Structure particulaire nette. Poreux. Friable. Nombreuses racines fines, chevelu. Transition nette, régulière.

B_{1g} 35-55 cm : Noyé. 10 YR 6/3 humide : brun clair avec taches irrégulières, à limites peu nettes, peu contrastées, 5 à 10 mm, 7,5 YR 6/6 humide : jaune rougeâtre. Concrétions ferrugineuses noires, dures, localisées. Texture de limon sablo-argileux. Structure prismatique moyenne à fine, nette. Poreux. Quelques revêtements argileux minces. Collant. Racines fines, verticales, entre les agrégats. Transition distincte.

B_{21g} 55-85 cm : Ressuyé. Bariolage contrasté en taches irrégulières ; 10 YR 7/1 humide : gris clair et 7,5 YR 6/6 humide : jaune rougeâtre. Texture limono-argilo-sableuse. Structure prismatique moyenne et fine, nette. Poreux. Revêtements argileux minces sur agrégats recouvrant 80 p. 100. Collant. Quelques racines fines entre les agrégats. Transition distincte.

B_{22g} 85-130 cm : Idem avec revêtements argileux minces sur les faces structurales verticales.

Prof. cm	Granulométrie (%)						Matière organique (%)				pH eau
	T_f	S_g	S_f	L_g	L_f	A	MO	C	N	C/N	
0-10	100	42,0	12,0	16,0	20,5	8,5	1,6	0,93	0,08	10,7	7,3
10-35	100	41,5	12,5	16,0	21,1	8,5	1,0	0,61	0,06	9,2	6,9
35-55	100	30,2	10,6	16,4	28,0	16,1	0,3	0,19	0,03	6,8	5,8
55-85	100	30,8	9,2	12,8	22,2	25,8	0,2	0,10	0,03	4,1	5,3
85-130	98	32,6	9,7	12,8	21,6	24,3					5,0

Cat. échang. mé./100 g					Taux sat.	Fer (%)		P_2O_5 (‰) assim.	Humidité (%)		
Ca	Mg	K	Na	T		total	libre		équiv.	rét.	flét.
6,58	0,21	0,18	0,03	4,6	Sat.	0,78	0,57	0,049	12,8	15,1	4,9
3,76	0,23	0,08	0,03	4,2	98	0,78	0,63	0,022	11,1	14,1	3,8
4,23	0,23	0,08	0,04	5,8	79	1,41	1,11		14,9	17,8	8,0
5,41	0,55	0,14	0,06	11,6	53	1,90	1,29		18,9	20,3	10,0
3,29	0,76	0,15		11,0	39	1,78	1,19		15,1	18,7	8,4

Sol lessivé à pseudogley. Profil 113

Localisation : Chezy (Allier) (8 km, N.-E. de Moulins) — Date : 2-10-1969
Topographie : Plane, surface subhorizontale — 3° 25′ 10″ E.
Végétation : Vieille forêt de chênes. Fougères, mousses — 46° 36′ N.
Roche-mère : Argile mio-pliocène — Z = 270 m

A_0 0-3 cm : Frais. 10 YR 3/2 humide : brun gris très foncé. Très humifère à débris organiques. Texture de sable limoneux, avec grains sableux individualisés. Structure fibreuse, peu nette. Très poreux. Transition très nette, régulière.

A_{11} 3-11 cm : Frais. 10 YR 5/4 humide : brun jaunâtre avec quelques traînées verticales brun gris. Humifère. Texture de sable limoneux à sable siliceux. Structure massive nette. Poreux. Friable. Nombreuses racines, grosses et chevelu très dense. Transition distincte.

A_{12} 11-23 cm : Ressuyé. 5 Y 6/3 humide : olive pâle avec quelques taches rouilleuses peu contrastées. Apparemment peu humifère. Texture de sable limoneux. Structure massive nette. Poreux. Friable. Nombreuses racines fines et moyennes, horizontales. Transition nette, régulière.

A_{2g} 23-35 cm : Ressuyé. 5 Y 6/3 humide : olive pâle avec taches de plus en plus contrastées, irrégulières, 5 à 10 mm ; 5 Y 7/1 humide : gris clair et taches irrégulières, 2-3 mm ; 7,5 YR 5/8 humide : brun vif. Texture de sable argileux. Structure massive. Peu poreux. Friable. Racines fines et moyennes, dans la masse de l'horizon. Transition distincte, irrégulière (langues descendant dans l'horizon B_{1g}).

Prof. cm	Granulométrie (%)						Matière organique (%)				pH eau
	T_f	S_g	S_f	L_g	L_f	A	MO	C	N	C/N	
0-3	80	38,0	13,0	9,5	18,0	7,5	14,3	8,42	0,459	18,3	4,6
3-11	100	45,0	13,5	10,5	18,0	8,5	4,4	2,58	0,123	21,0	4,6
11-23	100	45,5	14,0	11,0	18,0	9,0	2,4	1,42	0,056	25,4	4,8
23-35	100	42,0	13,5	12,0	19,0	12,0	1,6	0,97	0,045	21,6	4,8
35-50	100	32,0	11,0	11,0	19,5	25,5	1,0	0,60	0,043	13,9	4,7
50-70	100	22,5	7,0	8,5	28,5	33,5					4,8
70-110	100	21,5	7,5	8,0	25,5	37,5					4,9
110-130	100	27,0	7,5	9,0	16,5	40,0					5,1

Cat. échang. mé. 100 g				Taux sat.	Fer (%)			Al_2O_3 libre (‰)	P_2O_5 (‰) assim.	Hum. (%) équiv.
Ca	Mg	K	T		total	libre	amorphe			
4,49	1,53	0,69	16,6	40,5			0,27	1,0		35,5
0,50	0,19	0,18	7,1	12,0	0,76	0,51	0,32	1,08	0,020	17,0
0,25	0,08	0,10	5,8	7,5	1,27	0,94				14,2
0,50	0,17	0,08	5,5	13,5	1,75	1,31	1,12	0,86		15,1
0,50	0,76	0,14	12,8	11,0	3,08	2,31				19,3
2,00	3,82	0,33	24,0	25,5	3,58	1,87	1,79	1,73		28,0
4,74	5,80	0,33	26,3	41,5	3,21	1,38				31,6
5,99	5,50	0,26	21,7	54,0	3,08	1,47	1,61	1,24		26,5

B_{1g} 35-50 cm : Ressuyé. Bariolage contrasté en taches irrégulières à limites nettes ; 5 Y 7/1 humide : gris clair et 7,5 YR 5/8 humide : brun vif. Au sommet quelques concrétions noires, de quelques mm, individualisées, dures, de fer et de manganèse. Texture limono-

argilo-sableuse. Structure prismatique moyenne et fine, nette, à sous-structure polyédrique fine, nette. Peu poreux. Quelques revêtements argileux minces, associés à des vides. Peu collant. Racines, grosses à la base. Transition très nette, irrégulière.

B_{2g} 50-110 cm : Frais. Bariolage très contrasté avec fond ; 7,5 YR 5/8 humide : brun vif et traînées obliques et verticales ; 5 Y 7/2 humide : gris clair, à limites nettes, liées aux racines et aux faces structurales. Texture d'argile limono-sableuse. Structure prismatique moyenne très nette, sous structure polyédrique moyenne à fine très nette. Peu poreux. Revêtements argileux très minces sur les agrégats. Peu collant. Quelques racines fines entre les agrégats, souvent horizontales.

B_{3g} 110-130 cm. *Id.* B_{2g} mais structure et revêtements moins nets.

Sol brun acide. Profil 10

Localisation : Neuilly-le-Réal (Allier) (15 km, S.-E. de Moulins) — Date : 5-7-1969
Topographie : Mi-pente légère sur plateau légèrement ondulé — 3° 26′ 30″ E.
Végétation : Lande avec quelques pins et chênes, bruyère, genêt, petite oseille — 46° 27′ N.
Roche-mère : Sables et graviers mio-pliocènes — Z = 270 m

A_{11} 0-30 cm : Sec à frais. 10 YR 5/4 humide : brun jaunâtre ; 10 YR 6/4 sec : brun jaune clair. Peu humifère. Non calcaire. Texture de sable à sable grossier dominant. Graviers quartzeux peu abondants. Structure particulaire nette. Meuble. Poreux. Nombreuses racines, fines. Transition distincte, régulière.

A_{12} 30-60 cm : Frais. 10 YR 5/4 humide : brun jaune ; 10 YR 6/4 sec : brun jaune clair. Peu humifère. Non calcaire. Texture de sable à sable grossier dominant. Graviers quartzeux peu abondants à arêtes émoussées. Structure particulaire nette. Meuble. Poreux. Quelques racines, fines. Transition distincte, régulière.

Prof. (cm)	Granulométrie (%)						Matière organique (%)				pH eau
	T_f	S_g	S_f	L_g	L_f	A	MO	C	N	C/N	
0-30	95	64,0	20,5	5,0	5,0	4,0	0,8	0,47	0,05	11,2	5,2
30-60	91	63,0	17,5	5,0	7,5	6,5	0,5	0,27	0,03	9,6	5,0
60-80	84	61,5	18,0	6,0	8,0	6,5					5,5
80-100	86	61,5	21,5	5,0	7,0	5,0					5,2
100-120	81	68,0	17,0	4,5	7,0	3,5					5,4
120-130	75	76,0	13,0	4,0	4,5	2,5					5,8

Cation échangeable (mé./100 g)					Taux saturation	Fer (%)		Hum. (%) équiv.
Ca	Mg	K	Na	T		total	libre	
0,50	0,11	0,05	0,02	3,4	20	0,40	0,24	6,5
0,50	0,11	0,05	0,02	3,8	17	0,47	0,27	6,9
0,50	0,11	0,05	0,02	3,3	20	0,38	0,27	7,3
0,25	0,11	0,05	0,02	3,3	13	0,33	0,21	6,7
						0,32	0,19	6,3
								5,4

(B) C 60-80 cm : Frais. 10 YR 5/4 humide : brun jaune ; 10 YR 6,5/3, sec : brun pâle. Non humifère. Non calcaire. Texture de sable à sable grossier dominant. Graviers quartzeux peu abondants à arêtes émoussées. Structure particulaire nette. Meuble. Poreux. Quelques racines, fines. Transition nette, régulière.

C_1 80-100 cm : Frais. 10 YR 5/5 humide : brun jaunâtre ; 10 YR 7,5/3 sec : brun très pâle, puis *idem* (B) C.

C_2 100-120 cm : Frais. 10 YR 5/5 humide : brun jaunâtre ; 10 YR 8/3 sec : brun très pâle. Graviers quartzeux à arêtes émoussées puis *idem* (B) C.

C_3 120-130 cm et plus : Sec à frais. 10 YR 6,5/3 humide : brun pâle ; 10 YR 8/3 sec brun très pâle. Non humifère. Non calcaire. Texture de sable à sable grossier. Graviers de quartz de forme arrondie et irrégulière. Structure particulaire nette. Meuble. Poreux. Pas de racines.

Planosol. Profil 170

Localisation : Thiel-sur-Acolin (Allier) (18 km est de Moulins) — Date : 26-9-1969
Topographie : Plateau sub-horizontal — 3° 34′ 20″ E.
Végétation : Carrière dans friche à genêts — 46° 34′ 00′ N.
Roche-mère : Sables et argiles mio-pliocènes — Z = 250 m

$A_{p(g)}$ 0-35 cm : Brun gris foncé (10 YR 3/2) en humide, devenant gris brun clair (10 YR 6/2) en sec. Frais. Texture de sable grossier avec charge grossière formée de gravillons de 3-4 mm de quartz, grès et de graviers de 1 cm. Structure massive. Friable. Enracinement fin assez dense. Porosité moyenne. Présence de racines « gainées » de rouille. Limite tranchée, ondulée.

A_{12} 35-58 cm : Gris clair (2,5 Y 7/2) en humide devenant blanc (5 Y 8/1) en sec avec taches rouille vif verticales et remplissage brun gris dans les galeries. Frais. Texture sableuse à sable grossier avec charge grossière formée de gravillons de 3-4 mm et graviers de 6-10 mm roulotés (quartz). Structure massive. Friable. Quelques fines racines. Porosité tubulaire. Limite nette, ondulée.

A_{2g} 58-77 cm : Blanchâtre (2,5 Y 7,5/2) en humide devenant plus blanc (2,5 Y 8/0) en sec ; quelques taches rouilles. Texture de sable grossier avec gravillons de 3 à 6 mm peu roulés de quartz blanchâtre. Structure massive. Légèrement tassé. Pas de racines. Porosité tubulaire. Limite tranchée, ondulée.

II C 77-140 cm : Bariolé gris clair (5 Y 7/1) et orangé (7,5 YR 6/8) en humide devenant blanc (5 Y 8/1) et orangé (7,5 YR 6/8) en sec. Texture d'argile sableuse. Structure prismatique grossière. Quelques enduits argileux sur les prismes. Revêtements sableux au sommet des fissures. Collant. Porosité structurale. Passe à 2 m à une argile sablo-graveleuse.

Prof. (cm)	Granulométrie (%)					Matière organique (%)				pH eau
	S_g	S_f	L_g	L_f	A	MO	C	N	C/N	
0-35	61,5	15,0	6,5	8,5	6,5	1,7	0,99	0,081	18,7	5,6
35-58	62,0	12,0	5,5	11,5	8,5	0,5	0,31	0,032	9,7	6,0
58-77	60,5	18,5	6,0	9,0	6,0					6,2
77-140	27,5	15,5	6,5	11,0	39,5					4,9

Cation échang. (mé./100 g)				Taux sat.	Fer (%)			P_2O_5 (‰) assim.	Al_2O_3 (‰) libre	Hum. (%) équiv.
Ca	Mg	K	T		total	libre	amorphe			
1,00	0,05	0,03	10,2	10,5	0,35	0,22	0,15	0,014	0,95	11,5
0,75	0,03	0,03	10,5	7,5	0,24	0,24				11,0
0,75	0,05	0,03	3,5	23,5	0,11	0,03	0,03		0,59	8,6
2,50	0,19	0,15	13,9	20,5	2,35	1,52	1,24		1,24	25,8

Ann. agron., 1973, **24** (1), 63-76.

ÉTUDE DES VARIATIONS DE LA COMPOSITION MINÉRALE, PROTIDIQUE ET GLUCIDIQUE DES RACINES ET PARTIES AÉRIENNES DU DACTYLE

II. — Étude de l'évolution des glucides de réserve

Élisabeth LEFEBVRE-DROUET
avec la collaboration technique de Monique Jacquin

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
B. V. 1540. 21034 Dijon Cedex

RÉSUMÉ

Dans une étude précédente, nous avions observé que la composition minérale (K, Ca, Mg, Na, P), protidique (azote total, azote soluble) et glucidique (glucides solubles totaux, saccharose, glucides réducteurs) des zones de plateau de tallage et des racines du dactyle, prélevées à chaque coupe, restait à peu près constante.

Dans le but de compléter ces observations, nous avons entrepris de suivre l'évolution de ces différents constituants, ainsi que celle des fructosanes, qui n'avaient pas été étudiés précédemment, à l'intérieur de chaque cycle de végétation et pendant l'hiver.

Les résultats obtenus montrent que les teneurs et les variations sont toujours faibles dans les racines, quel que soit l'élément considéré. Dans les zones de plateau de tallage, par contre, nous constatons des variations importantes de la composition glucidique, en particulier des fructosanes. Ceux-ci constituent la forme dominante des glucides dans les zones de plateau de tallage, leur teneur est beaucoup plus élevée que dans les parties aériennes et les racines. Leur évolution, au cours de chaque cycle, confirme le rôle important joué par ces glucides au moment de la repousse et montre que chez le dactyle, les zones de plateau de tallage constituent le principal organe de réserves.

INTRODUCTION

Dans une étude précédente (Lefebvre-Drouet, 1970), nous avions suivi l'évolution de la composition minérale, protidique et glucidique d'un dactyle cultivé en plein champ.

Trois fractions de la plante avaient été étudiées séparément : les parties aériennes, les zones de plateau de tallage et les racines. Les parties aériennes avaient été prélevées périodiquement au cours de chaque cycle végétatif ; quant aux zones de plateau de tallage et aux racines, en raison de difficultés matérielles rencontrées, nous avions dû nous limiter à un prélèvement par cycle, au moment de la coupe.

Les déterminations de la composition glucidique comprenaient les dosages des glucides solubles totaux, du saccharose et des glucides réducteurs. Les fructosanes qui constituent la forme essentielle des glucides de réserve, chez le dactyle, n'avaient pas été dosés.

Les résultats obtenus avaient montré que les teneurs en éléments minéraux, en protides et en glucides des zones de plateau de tallage et des racines restaient à peu près constantes à chacune des coupes.

Dans le but de suivre l'évolution des différents constituants précédemment étudiés, de façon plus complète dans les zones de plateau de tallage et dans les racines, nous avons mis en place un nouveau dispositif qui nous a permis de prélever les trois fractions du végétal, à intervalles réguliers au cours de chaque cycle végétatif.

Étant donné le rôle important joué par les fructosanes dans la physiologie de la plante, il nous a paru intéressant de suivre également les variations de cette forme de glucides, dans toutes les parties de la plante.

MATÉRIEL ET TECHNIQUES

1. — *Matériel*

Les prélèvements des racines présentent quelques difficultés dans les cultures en plein champ. Pour pallier ces difficultés, l'essai a été réalisé en vases de végétation. Chaque pot contient 6 kg de terre de même origine que celle de l'essai en plein champ mélangée avec un tiers de sable quartzeux.

La fertilisation est la suivante (exprimée en mg/kg de terre) :

P	K	N (par semaine)
400	800	25

Le phosphore et le potassium sous forme de superphosphate et de K_2SO_4 ont été incorporés à la terre au moment de la mise en route de l'essai. L'azote a été apporté toutes les semaines sous forme d'une solution de $Ca(NO_3)^2$.

Les plantes, à raison de trois par pot, proviennent d'un semis de dactyle, variété *Floréal*. Les jeunes plantes ont été triées avant repiquage pour diminuer l'hétérogénéité.

Afin de se rapprocher le plus possible des conditions naturelles, l'expérience a été effectuée en plein air, et les pots ont été enterrés dans le sol.

2. — *Prélèvements*

L'essai a été mis en route au cours de l'été 1969, les prélèvements ont commencé au printemps 1970 et se sont poursuivis jusqu'au printemps 1971. Ils ont eu lieu, en principe toutes les semaines pendant la période de végétation et une fois par mois pendant l'hiver 1970-1971.

Six coupes ont été effectuées, la première au début épiaison, et ensuite toutes les quatre semaines. Le deuxième cycle a dû être interrompu 15 jours après la première coupe, car de nombreux épis sont apparus de nouveau.

A chaque prélèvement, deux pots ont été sacrifiés en vue de l'analyse : les parties aériennes (PA) coupées à 4 cm du niveau du sol, le reste de la plante lavé et séparé en deux fractions : les

zones de plateau de tallage (ZPT) qui correspondent à la base des tiges et des gaines et le plateau de tallage proprement dit, et les racines (R). Nous obtenons ainsi trois fractions.

Chacune de ces fractions est ensuite traitée selon la technique décrite dans l'article précédent au paragraphe « Mode de prélèvement ».

3. — *Méthodes analytiques*

Elles ont été également décrites dans le mémoire précédent ; une modification intervient pour l'extraction des composés azotés solubles et des composés glucidiques : dans le but d'extraire séparément les gluco-fructosanes à chaînes longues, la concentration de l'alcool servant aux extractions est de 80°GL au lieu de 50°GL. En effet, les fructosanes solubles dans l'alcool à 50°GL sont insolubles dans l'alcool à 80°GL tandis que les autres glucides et les composés azotés solubles restent en solution.

3. 1. — *Extraction des fructosanes*

Les fructosanes contenus dans le résidu de l'extraction alcoolique sont repris par l'eau au bain-marie bouillant.

Trois extractions successives sont nécessaires : la première d'une durée de 35′, la seconde de 15′, la troisième 5′. Le volume final du filtrat est de 500 ml.

3. 2. — *Dosages effectués*

— Matières minérales : Ca, Mg, K, Na, P, selon les techniques usuelles ;
— Azote total par la méthode Kjeldhal, après réduction des nitrates ;
— Azote soluble total par la méthode Kjeldahl, après réduction des nitrates ;
— Glucides réducteurs solubles par la méthode Somogyi ;
— Glucides solubles totaux après hydrolyse par HCl à pH 2 ;
— Saccharose après action de l'invertase ;
— Fructosanes par la méthode au résorcinol alcoolique (McRary *et al.*, 1945).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — *Évolution pondérale de la matière sèche au cours des cycles* (fig. 1)

L'évolution du poids des parties aériennes est très différente de celle des zones de plateau de tallage et des racines.

Pour les parties aériennes, nous constatons une augmentation rapide et continue entre le début et la fin de chaque cycle.

Pour les zones de plateau de tallage et les racines, nous observons la tendance suivante : au début de chaque cycle, la masse diminue puis remonte plus ou moins rapidement pour retrouver à peu près la valeur initiale en fin de cycle. Les variations ne sont pas toujours significatives ; le poids de matière sèche des zones de plateau de tallage varie au maximum de 3 à 5 g par plante et celui des racines de 5 à 7 g.

Dans nos conditions expérimentales, la quantité de matière sèche des trois fractions étudiées est répartie comme suit, par ordre décroissant : racines, zones de plateau de tallage et parties aériennes, tandis que dans notre expérience de plein champ, le poids des zones de plateau de tallage était supérieur à celui des racines. Mais on peut penser que dans la culture en pot, d'une part le substrat constitue un

milieu plus favorable au développement racinaire, d'autre part la récupération des racines est totale dans un pot et les pertes au moment de la préparation de l'échantillon sont plus faibles du fait de la structure moins compacte du sol.

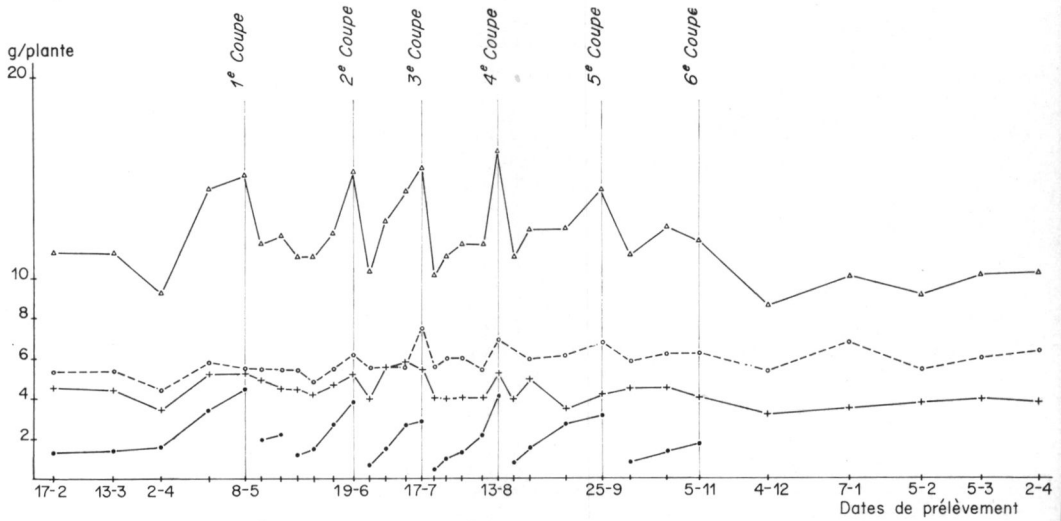


FIG. 1. — *Évolution pondérale de la matière sèche dans les diverses parties de la plante*

● ——— Parties aériennes
\+ ——— Zones de plateau de tallage
○ - - - - - - Racines
△ ——— Plante entière.

2. — *Composition minérale* (fig. 2)

Comme nous l'avons mentionné dans notre mémoire précédent, à chaque coupe, la teneur en éléments minéraux diffère selon les parties de la plante ; elle est toujours plus élevée dans les parties aériennes que dans les zones de plateau de tallage et les racines, les écarts étant plus ou moins importants selon l'élément considéré. Dans les zones de plateau de tallage, les teneurs sont en général plus importantes que dans les racines. Certaines de ces valeurs sont supérieures à celles qui avaient été observées en plein champ : c'est le cas de P, Mg, Na dans les parties aériennes, et de K, Mg, Na dans les zones de plateau de tallage.

Les variations enregistrées au cours de chaque cycle végétatif sont également différentes suivant les parties de la plante et l'élément minéral. Quel que soit l'élément considéré, les variations sont toujours plus importantes dans les parties aériennes que dans le reste de la plante ; par contre, elles sont toujours très faibles dans les racines. Dans les zones de plateau de tallage, seul K présente des variations sensibles, surtout au 2e cycle. Elles sont beaucoup plus atténuées aux cycles suivants, mais ont tendance à aller dans le même sens que celles des parties aériennes.

On peut observer, dans la plante entière, à partir du quatrième cycle, une augmentation des teneurs en Na et Mg, probablement due aux eaux d'irrigation riches en ces deux éléments ; le même phénomène a déjà été observé en 1967 sur le dactyle en plein champ irrigué avec une eau de même origine. Les teneurs en Na étant très faibles, leurs variations n'ont pas été portées sur la figure.

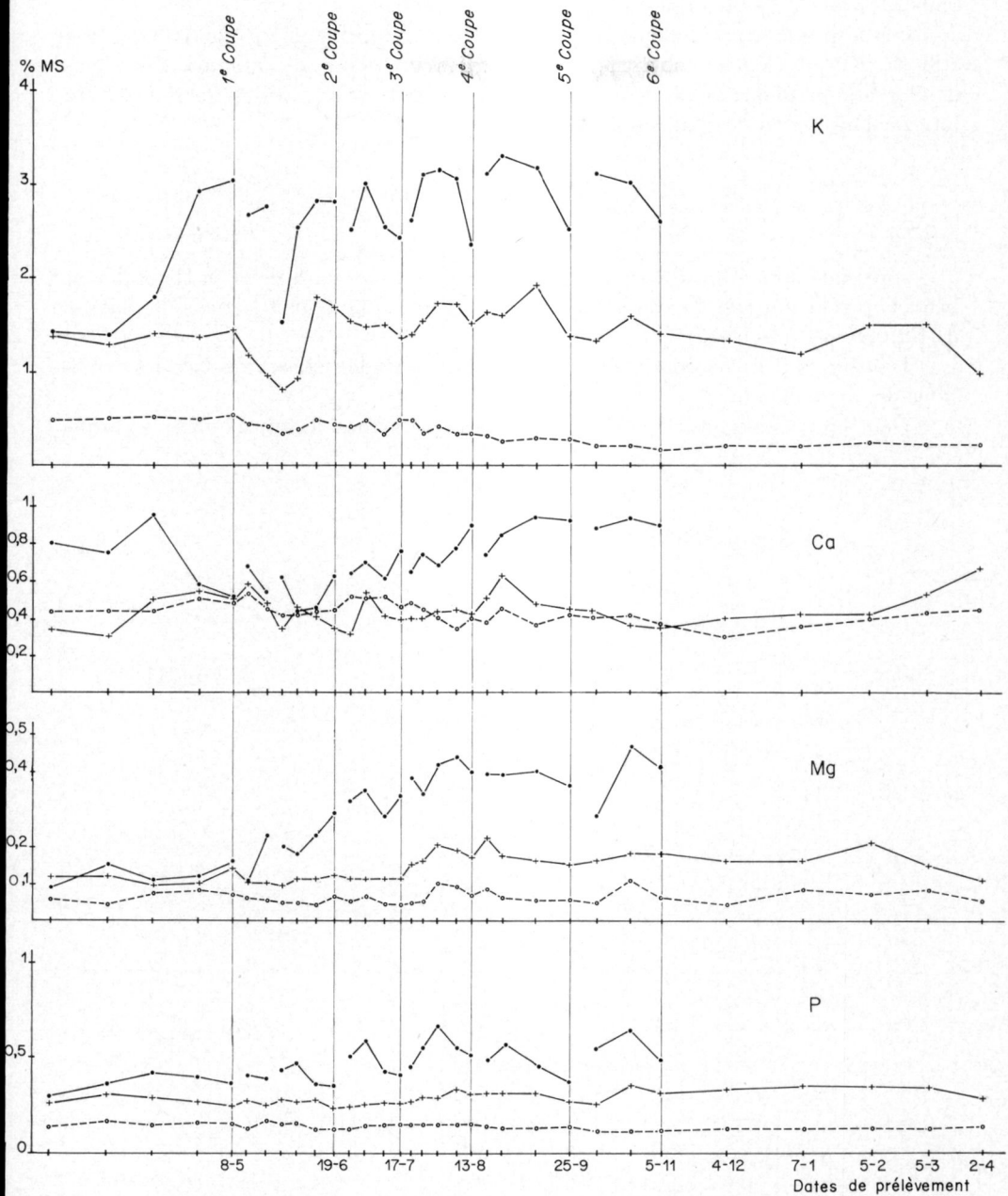


FIG. 2. — *Variations des teneurs en K, Ca, Mg, P dans les trois parties de la plante*

● ——— Parties aériennes
\+ ——— Zones de plateau de tallage
○ - - - - - - Racines

Au cours de l'hiver, aucune variation de la composition minérale n'est observée dans les zones de plateau de tallage ni dans les racines.

Ces résultats montrent que les racines jouent uniquement un rôle d'absorption et de transit des éléments nutritifs vers les parties supérieures de la plante. Les zones de plateau de tallage, aussi bien au point de vue teneur et variations, constituent un intermédiaire entre les parties aériennes et les racines.

3. — *Matières azotées* (fig. 3)

N total.

Ainsi que nous l'avons déjà signalé, les teneurs et les variations en N total sont beaucoup plus importantes dans les parties aériennes que dans les zones de plateau de tallage et les racines.

Dans les parties aériennes, elles sont identiques à celles observées dans les conditions de plein champ.

Dans les zones de plateau de tallage et dans les racines, les taux sont très voisins

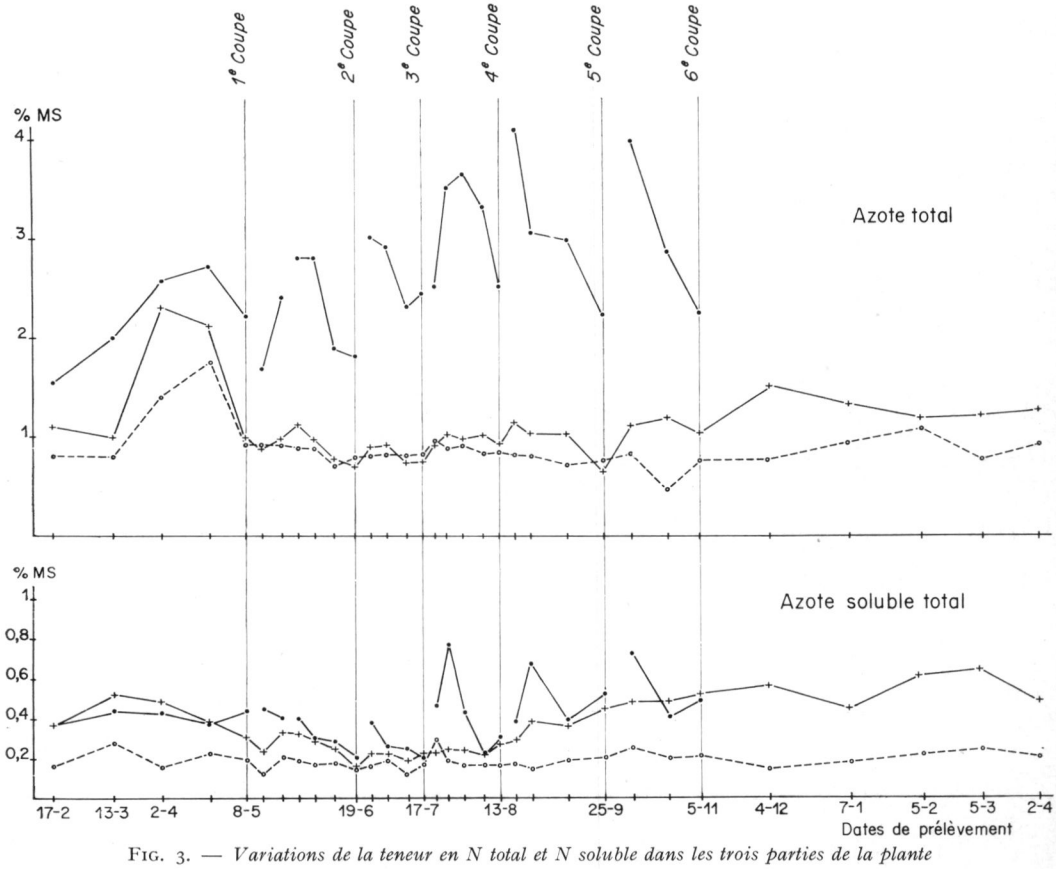


FIG. 3. — *Variations de la teneur en N total et N soluble dans les trois parties de la plante*

● ——— Parties aériennes
\+ ——— Zones de plateau de tallage
○ - - - - - - Racines

jusqu'au 4e cycle, de l'ordre de 0,7 p. 100 ; à partir du 5e cycle, et pendant l'hiver, ils sont plus élevés dans les zones de plateau de tallage (> 1 p. 100). L'évolution au cours du premier cycle est identique dans ces deux fractions et parallèle à celle des parties aériennes ; aux cycles suivants, les variations très faibles dans les racines, apparaissent plus nettement dans les zones de plateau de tallage : nous observons une augmentation en début de cycle et une diminution en fin de cycle (les valeurs oscillent entre 0,7 et 1 p. 100). Au cours de l'hiver, aucune variation importante n'est enregistrée.

N soluble.

A la fin de chaque cycle, les teneurs observées dans les parties aériennes et dans les zones de plateau de tallage sont très voisines (0,3 à 0,5 p. 100) ; elles sont plus faibles dans les racines (0,2 p. 100).

Au cours de chaque cycle, les variations sont très faibles dans les zones de plateau de tallage et dans les racines ; elles sont beaucoup plus importantes dans les parties aériennes.

Nos résultats sur l'évolution des matières azotées au cours des cycles végétatifs sont bien en accord avec ceux de SPRAGUE et SULLIVAN (1950-1952) ; par contre, nous n'enregistrons pour ainsi dire pas de variations de N soluble alors que ces auteurs signalent que l'azote total et l'azote soluble augmentent dans les zones de plateau de tallage et dans les racines aussitôt après la coupe, et que cette augmentation serait due à une absorption plus active de l'azote du sol.

4. — *Glucides* (fig. 4)

Glucides solubles totaux.

Les teneurs et les variations observées dans les parties aériennes au cours de chaque cycle végétatif sont identiques à celles obtenues en plein champ en 1967. Elles sont plus importantes que dans le reste de la plante.

Dans les zones de plateau de tallage et dans les racines, les taux sont assez voisins, avec une tendance à être plus faibles dans les racines à partir du 3e cycle et pendant l'hiver. L'évolution est identique dans ces deux fractions : nous observons une diminution au début du cycle végétatif puis une remontée en fin de cycle jusqu'à un niveau à peu près égal à la valeur initiale, sauf au deuxième cycle.

Au cours de l'hiver, de début décembre à janvier, la teneur augmente de façon significative à la fois dans les zones de plateau de tallage et dans les racines, puis se stabilise jusqu'au printemps suivant.

Glucides réducteurs.

Les valeurs observées sont en général faibles : elles sont de l'ordre de 2 p. 100 dans les parties aériennes et dans les zones de plateau de tallage ; elles n'excèdent pas 1 p. 100 dans les racines.

Les variations, très faibles dans les zones de plateau de tallage et dans les racines tout au long de l'année, sont plus importantes dans les parties aériennes surtout aux premiers cycles.

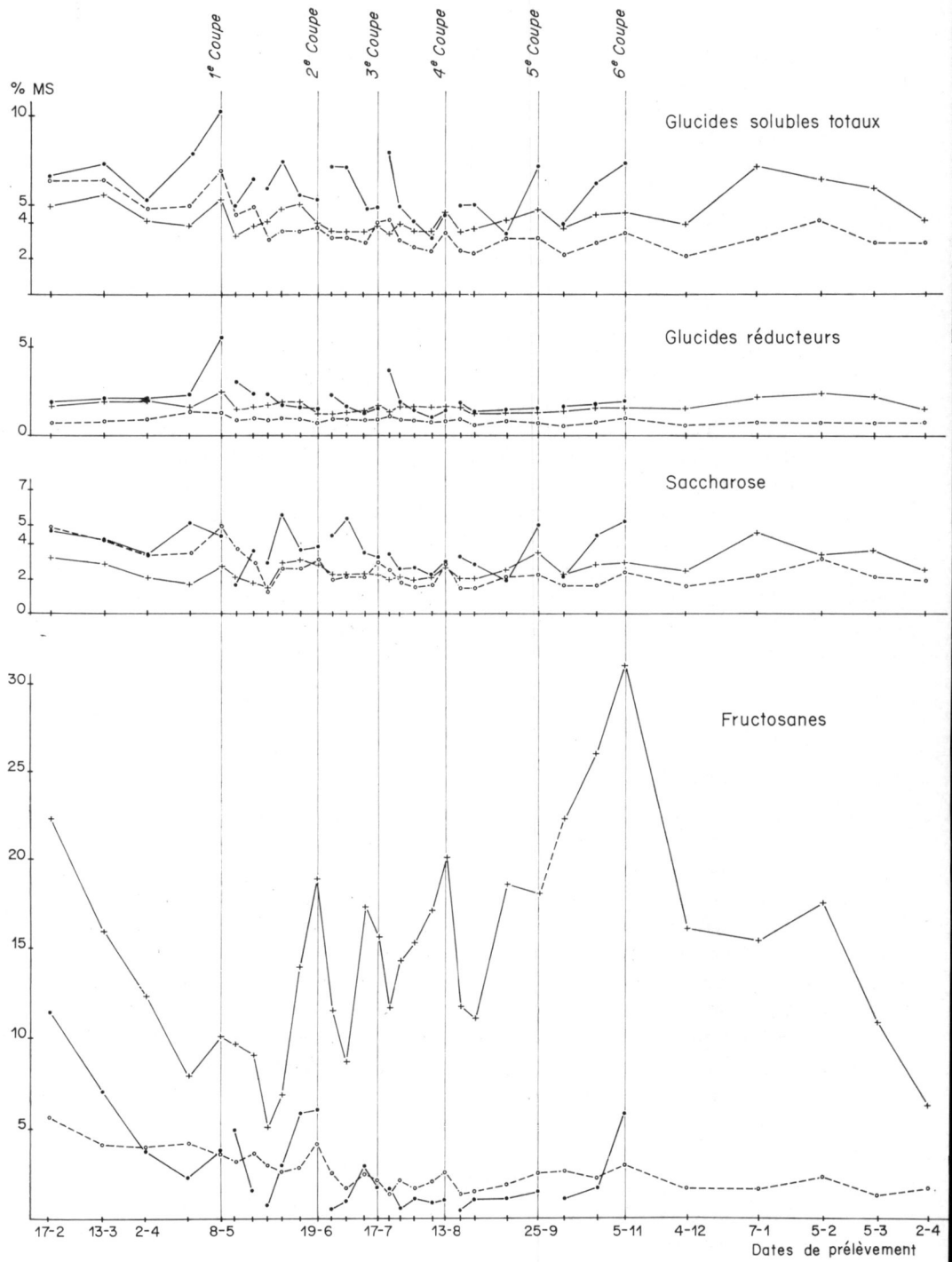


FIG. 4. — *Variations de la teneur en glucides solubles totaux, saccharose, glucides réducteurs, fructosanes, dans les trois parties de la plante*

● ——— Parties aériennes
\+ ——— Zones de plateau de tallage
○ - - - - - - Racines

Saccharose.

Le saccharose représentant la fraction la plus importante des glucides solubles totaux, les variations vont exactement dans le même sens que celles des glucides solubles totaux.

Fructosanes.

Ils constituent la principale forme de substances glucidiques de réserve chez les graminées de nos régions. Ce sont des polysaccharides formés par la condensation de *n* molécules de fructose associée à une molécule de glucose (*n* pouvant atteindre 25 à 30).

Ils sont essentiellement accumulés dans les gaines et la base des tiges (SULLIVAN et SPRAGUE, 1950 ; WAITE et BOYD, 1953 ; BAKER, 1957). D'après WAITE et BOYD, ils pourraient être formés dans les feuilles mais n'y seraient pas accumulés en grande quantité ; la plupart des hydrates de carbone en excès passeraient dans les tiges où ils y seraient stockés à l'état de fructosanes.

D'après BAKER (1957), seuls les hydrates de carbone simples sont synthétisés dans les feuilles, ils migrent vers les tiges et les racines où ils s'accumulent sous forme de polysaccharides plus complexes : les fructosanes.

Ces glucides jouent un rôle très important dans la physiologie de la plante : en général, dans un cycle naturel, l'accumulation des réserves se produit pendant la période où la croissance est lente mais la photosynthèse active, c'est-à-dire au début du printemps, en été (en période sèche) et surtout en automne. Ces réserves sont ensuite utilisées pendant les périodes de croissance rapide, au printemps pour l'initiation et le développement des nouvelles pousses, au moment de la floraison et enfin en hiver pour les besoins métaboliques. Le cycle d'accumulation et de mobilisation est donc très lié aux rythmes de croissance et à l'activité phytosynthétique.

L'élimination des parties aériennes modifie le niveau de ces réserves, car aussitôt après une coupe, elles sont utilisées pour la formation de nouveaux tissus photosynthétiques, et sont ensuite reconstituées quand la photosynthèse a repris une activité suffisante et que les tissus sont capables de synthétiser des hydrates de carbone en excès.

Les résultats suivants présentent les variations des fructosanes dans les diverses parties de la plante au cours de chaque cycle végétatif.

a) *Les parties aériennes.* — Le taux est en général faible surtout pendant les cycles d'été, le maximum atteint 1 à 1,5 p. 100 ; par contre, au 2e cycle (printemps) et au dernier cycle (automne), ce taux est beaucoup plux élevé, et peut atteindre en fin de cycle des valeurs voisines de 6 p. 100. Les variations sont plus ou moins importantes selon le cycle végétatif ; nous observons dans la plupart des cas, une augmentation entre le début et la fin du cycle, sauf au premier où nous notons une diminution depuis le démarrage de la végétation avec une légère remontée en fin de cycle. La forte teneur enregistrée au cours de ce cycle provient du fait que les parties aériennes prélevées se composent non seulement des limbes, mais également de tiges et de gaines.

b) *Les zones de plateau de tallage.* — Les taux sont baucoup plus élevés que dans les parties aériennes et les variations sont plus importantes. L'évolution au cours du premier cycle, qui est le cycle de reproduction, est identique à celle des parties aériennes. Cette diminution enregistrée tout au long du cycle peut s'expliquer par la mobilisation importante des glucides de réserves pour le départ de la végétation, au moment

de la formation des ébauches florales et au cours de la montaison. Au cours des cycles suivants, cycles uniquement végétatifs, l'évolution est différente : au début de chaque cycle, nous observons une chute rapide et importante du taux de fructosanes pendant la première semaine environ, puis une remontée jusqu'à la fin du cycle pour atteindre, à la coupe, une valeur identique ou supérieure à celle de la coupe précédente. Au cours du quatrième cycle (période estivale), l'évolution est plus rapide : la chute a lieu pendant les quatre premiers jours, et, une semaine après la coupe, nous observons déjà une remontée importante (le taux a presque atteint celui de la coupe précédente).

Au dernier cycle, les prélèvements ayant été effectués seulement 15 jours après la coupe, nous n'avons pas observé cette diminution. A la fin de ce cycle, nous notons une teneur très élevée en fructosanes, voisine de 30 p. 100 de la matière sèche, alors qu'à la fin des autres cycles, elle se situe entre 15 et 20 p. 100.

Après la dernière coupe (début novembre jusqu'à début décembre), nous observons une diminution du taux de fructosanes liée en partie au maintien de l'activité respiratoire de la plante à partir des produits d'hydrolyse de ces glucides (BAKER, 1957) ; ensuite, le taux reste stable pendant la période des grands froids, et à partir de février, nous retrouvons une évolution identique à celle du 1er cycle de l'année précédente.

c) *Les racines.* — Elles ont une teneur beaucoup plus faible en fructosanes : environ 4 p. 100 à la fin des deux premiers cycles, et 2 p. 100 aux cycles ultérieurs. Les variations sont également faibles au cours des cycles : au 1er cycle, nous observons une grande stabilité tandis qu'aux cycles suivants, nous enregistrons comme dans le cas des zones de plateau de tallage, une diminution en début du cycle puis une remontée pour atteindre en fin de cycle à peu près le niveau initial. Au cours de l'hiver, nous n'observons aucune variation, le taux se maintient aux environs de 2 p. 100.

Rapport fructosanes/glucides totaux (fig. 5).

Les glucides totaux représentent l'ensemble des fructosanes et des glucides solubles.

Dans les parties aériennes, la proportion de fructosanes par rapport aux glucides totaux est très variable au cours de chaque cycle : faible au début, elle est plus importante à la fin et peut atteindre 50 p. 100 au 2e cycle (cycle de printemps) et 40 p. 100 au dernier cycle (automne), ce qui correspond aux maxima mentionnés par GAUSSÈRES. Pendant les cycles d'été, le rapport reste faible et se situe aux environs de 0,20. Le premier cycle se comporte différemment : nous enregistrons en effet une diminution du rapport tout au long de ce cycle.

Dans les zones de plateau de tallage, l'évolution du rapport diffère suivant les cycles. Au cours du premier cycle, nous observons, comme dans le cas des parties aériennes, une diminution de ce rapport tout au long du cycle, diminution due à l'utilisation importante des réserves (le taux passe de 20 p. 100 en début de cycle à 10 p. 100 à la fin), alors que le niveau des glucides solubles varie seulement de 4 à 5,5 p. 100. Le 2e cycle qui, comme nous l'avons signalé, a été interrompu par une coupe supplémentaire, 15 jours après la 1re coupe, présente une semaine après cette interruption une chute brutale du rapport fructosanes/glucides totaux. Cette chute est due à une nouvelle mobilisation de fructosanes pour permettre la croissance des

parties aériennes alors que le niveau de réserves n'a pas eu le temps de se reconstituer. Dans les autres cycles qui sont uniquement des cycles végétatifs, le rapport est très élevé et varie dans des limites faibles, entre 0,75 et 0,85, compte tenu de la proportion importante de fructosanes par rapport aux glucides totaux et de l'évolution parallèle de ces diverses formes de glucides. Après la dernière coupe (début novembre) et jusqu'au printemps suivant, le rapport décroît à la fois parce que le taux de fructosanes décroît fortement pendant cette période et parce que celui des glucides solubles augmente au début de l'hiver pour se stabiliser ensuite.

Dans les racines, la teneur en différents glucides est en général faible, le rapport

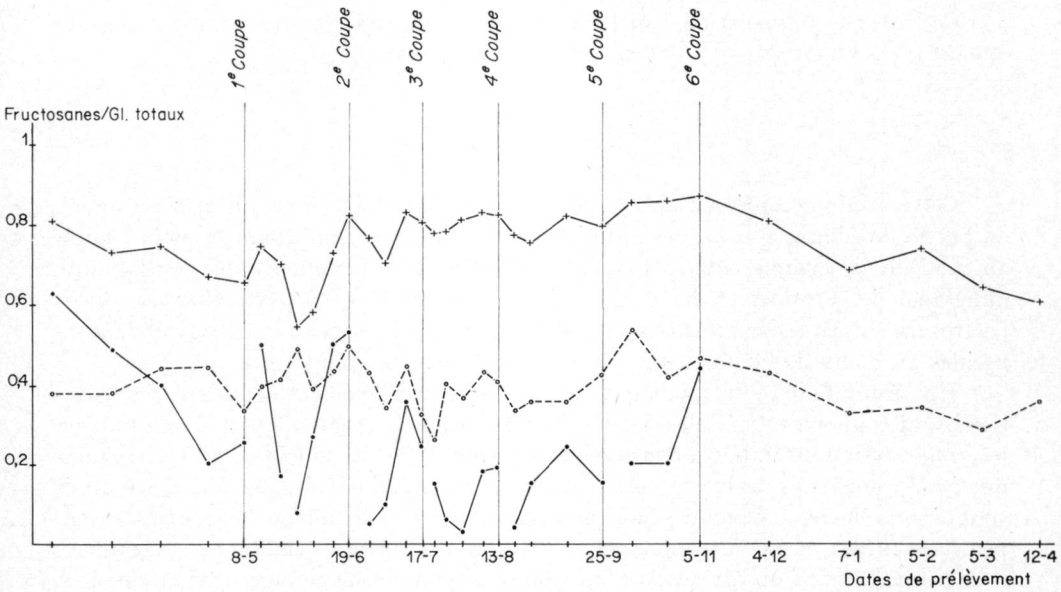


FIG. 5. — *Variations du rapport fructosanes sur glucides totaux dans les trois parties de la plante*

● ——— Parties aériennes
\+ ——— Zones de plateau de tallage
○ - - - - - - Racines

fructosanes sur glucides totaux est assez fluctuant au cours de l'année, il varie de 0,3 à 0,5. Ces résultats montrent que, chez le dactyle, les racines ne constituent pas un organe de réserves.

En résumé, ces résultats montrent que la teneur et l'évolution des différentes formes de glucides étudiées sont très variables dans les diverses parties de la plante.

Dans les parties aériennes, ce sont les glucides solubles, dont le saccharose représente la fraction la plus importante, qui prédominent ; les fructosanes sont en général en quantité faible. Les variations sont importantes au cours de chaque cycle quelle que soit la forme de glucides considérée.

Dans les zones de plateau de tallage, les fructosanes constituent la principale forme des glucides, la teneur peut atteindre jusqu'à 30 p. 100 de la matière sèche, tandis que les glucides solubles ne représentent que de faibles quantités (maximum 5 à 6 p. 100). Les variations des fructosanes sont très importantes au cours de chaque cycle, elles illustrent bien le rôle primordial attribué à ces glucides au moment de la

repousse. Les variations des glucides solubles sont assez faibles mais vont toujours dans le même sens que celles des fructosanes. Cette diminution du taux de glucides observée au début de chaque cycle, se répercute sur la masse des zones de plateau de tallage qui enregistre à ce moment une baisse très sensible, pouvant atteindre jusqu'à 20 p. 100 de la matière sèche. La chute brutale enregistrée au cours de l'hiver explique le manque de relation observée par MÉRIAUX (1971) entre la repousse de la plante au printemps et la teneur en fructosanes à l'automne.

Dans les racines, les glucides solubles et les fructosanes sont présents en quantité assez voisine, avec une légère prédominance des glucides solubles. Les taux et les variations sont plus faibles que dans les autres parties de la plante.

Ces diverses observations sur l'évolution des glucides concordent avec celles de SPRAGUE et SULLIVAN (1950) et de BAKER et GARWOOD (1961).

CONCLUSION

Cette étude complémentaire nous a permis d'une part, de confirmer, au moins en partie, les données obtenues antérieurement dans des conditions de plein champ au moment de chaque coupe, d'autre part, de préciser l'évolution des constituants minéraux, des protides et des diverses formes de glucides, en particulier les glucofructosanes, dans les parties aériennes, dans les zones de plateau de tallage et dans les racines au cours de chaque cycle de végétation et pendant l'hiver.

Les résultats obtenus montrent que, quel que soit l'élément considéré, les variations sont toujours très faibles dans les racines. Dans les zones de plateau de tallage, les seules variations importantes enregistrées sont celles des glucides et en particulier des fructosanes. Ces derniers constituant la forme principale des glucides de réserves sont essentiellement accumulés dans les zones de plateau de tallage. Les parties aériennes et les racines en renferment des quantités faibles surtout pendant les cycles d'été.

Les variations observées dans les zones de plateau de tallage mettent bien en évidence que ces dernières sont sans cesse le siège soit de polymérisations donnant des fructosanes à plus ou moins longues chaînes qui s'accumulent quand les hydrates de carbone sont en excès par rapport aux besoins de la plante, soit de dégradations par hydrolyse donnant des composés à faibles poids moléculaires qui peuvent alors à nouveau migrer facilement et être utilisés par la plante suivant ses besoins. De ce fait, les zones de plateau de tallage jouent un rôle régulateur du métabolisme des glucides chez le dactyle.

Reçu pour publication en août 1972.

SUMMARY

STUDY OF THE VARIATIONS IN THE MINERAL, PROTIDE AND GLUCIDE COMPOSITION OF THE ROOTS AND AERIAL PARTS OF DACTYLIS

II. — STUDY OF THE VARIATIONS IN STORED GLUCIDS

In a former study, it has been shown that the mineral (K, Ca, Mg, Na, P), protidic (total nitrogen, soluble nitrogen) and glucidic (total soluble glucids, saccharoze, reducing glucids) composition of the tillering plateau areas and the roots of dactylis, sampled on each cut, remains substantially constant.

With a view to completing these remarks, the variation of these various constituents has been followed as well as those of the fructosanes which had not been studied formerly, within each vegetation cycle and during winter.

The results obtained show that the contents and variations are still low in the roots, whatever the element considered. Conversely, in the tillering plateau areas, large variations in the glucidic composition in particular of fructosanes, are found. The latter are the predominant type of glucid in such areas, their contents being much higher than in the aerial parts and the roots. Their evolution during each cycle confirm the prime role played by said glucids when growth is resumed and it shows that the dactylis, the tillering plateau areas constitute the main storage organ.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER ÄNDERUNGEN DER ZUSAMMENSETZUNG DER MINERALE, PROTIDE UND GLYZIDE DER WURZELN UND DES SPROSSES DES DACTYLIS (KNAULGRAS)

II. — UNTERSUCHUNG DER EVOLUTION DER RESERVEGLYZIDE

In einer vorhergehenden Untersuchung hatten wir beobachten können, dass die Zusammensetzung an Mineralstoffen (K, Ca, Mg, Na, P) an Protiden und Glyziden (lösliche Glyzide, Saccharose, reduzierende Glyzide) der Verästelungsplatten und der Wurzeln des Dactylis, die bei jedem Schnitt entnommen wurden, etwa konstant bleibt.

Um diese Beobachtungen zu vervollständigen haben wir die Evolution dieser einzelnen Bestandteile, sowie die der Fructosane innerhalb der einzelnen Wachstumszyklen und während des Winters verfolgt.

Die Resultate zeigen, dass sowohl der Gehalt als dessen Änderungen für alle betrachteten Elemente in den Wurzeln klein bleiben. In dem Bereiche der Verästelungsplatten dagegen konnten bedeutende Änderungen in der Zusammensetzung der Glyzide und insbesondere im Fruchtosangehalt verzeichnet werden. Diese letzteren stellen den überwiegenden Teil der Glyzide im Bereich der Verästelungsplatten und ihr Gehalt ist dort viel grösser als in den Sprossen und in den Wurzeln. Ihr Evolution im Laufe der einzelnen Wachstumszyklen bestätigen die wichtige Rolle, welche diese Glyzide während des Wiederaufwachsens spielen, und zeigen, dass beim Dactylis der Bereich der Verästelungsplatten das wichtigste Speicherorgan fär Reserven darstellt.

РЕЗЮМЕ

Изучение изменений минерального, белкового и сахарного состава корней и надземных частей ежи.

Елизавета ЛЕФЕВР-ДРУЭ.

В предидущем изучении отмечалось что минеральный (K, Ca, Mg, Na, P), азотный (общий азот, растворимый азот) и сахарный (сумма растворимых сахаров, сахароза, сахара-восстановители) составы зон узла кущения и корней образцов ежи каждого укоса, оставались приблизительно одними и теми-же.

Для пополнения уже проведенных наблюдений, необходимо было проследить эволюцию всех этих составных, также как и фруктозанов, (не изучавшихся прежде), в течении каждого вегетативного цикла и зимой.

Полученные данные показывают что изменения содержаний бывают всегда очень небольшими в корнях, какой-бы не рассматривался элемент. В зонах-же узла кущения можно констатировать, наоборот, крупные изменения в составе сахаров, и в частности фруктозанов. Эти последние представляют доминантную форму сахаров в зоне узла кущения и их содержание в этои месте гораздо больше, чем в надземных частях растения или в корнях. Их эволюция в течении каждого вегетативного цикла подтверждает важность роли этих сахаров в момент отроста и показывает что зона узлов кущения является у ежи главным органом запаса.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKER H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. III. The influence of cutting treatments on the root, stubble and herbage production of a perennial ryegrass sward. *J. Brit. Grass. Soc.*, **12**, 116-126.

BAKER H. K., GARWOOD E. A., 1961. Studies on the root development of herbage plants. V. Seasonal changes in fructosan and soluble-sugar contents of cocksfoot herbage, stubble and roots under two cutting treatments. *J. Brit. Grassl. Soc.*, **16**, 263-267.

GAUSSÈRES B., 1965. Étude des variations des teneurs en glucides cytoplasmiques et membranaires du dactyle au cours de l'année. *Ann. Biol. anim. Bioch. Biophys.*, **5** (3), 361-383.

LEFEBVRE-DROUET E., 1970. Étude des variations de la composition minérale, protidique et glucidique des racines et des parties aériennes du dactyle (influence de la fertilisation potassique). *Ann. agron.*, **21** (4), 385-402.

MCRARY W. L., SLATERRY M. C., 1945. The colorimetric determination of fructosan in plant material. *J. Biol. Chem.*, **157**, 161-167.

MÉRIAUX S., 1971. Arrière-effet de l'irrigation sur le premier cycle de deux graminées fourragères (*Dactylis glomerata* L. et *Festuca pratensis* L.) *Ann. agron.*, **22** (1)95-111.

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.*, **195**, 19-23.

SPRAGUE V G., SULLIVAN J. T., 1950. Reserve carbohydrates in orchard grass clipped periodically. *Plant Physiology*, **25**, 92-102.

SULLIVAN J. T., SPRAGUE V. G., 1953. Reserve carbohydrates in orchard grass cut for hay. *Plant Physiology*, **28**, 304-313.

TROUGHTON ,1957. *The underground organe of herbage grasses*, 49-68.

Ann. agron., 1973, **24** (1), 77-133.

HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE ET DIFFUSION DES CATIONS COMPENSATEURS (1)

R. CALVET

Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Les quantités d'eau adsorbées et les valeurs des espacements interlamellaires déterminées par diffraction des rayons X constituent les données expérimentales. Les résultats essentiels sont les suivants :

— l'importance de l'adsorption de l'eau et ses modalités dépendent très étroitement de la nature des cations compensateurs ;
— le développement de l'hydratation se fait par étapes ;
— l'écartement des feuillets dépend de la compétition entre les forces de cohésion inter-feuillets et les effets de l'hydratation des cations.

L'interprétation de ces observations repose sur la description de l'état anhydre et des états hydratés à l'aide des différentes énergies d'interaction qui caractérisent le système argile-eau. Il apparaît également, que l'eau adsorbée doit être décrite en considérant que les molécules sont réparties en plusieurs populations dont les propriétés dépendent du pouvoir polarisant des cations.

INTRODUCTION

La surface souvent très grande et la présence de charges électriques négatives confèrent aux argiles d'importantes propriétés physico-chimiques. Cette étude concerne la montmorillonite de Camp-Berteau qui est, à cet égard, un minéral particulièrement intéressant.

Du point de vue morphologique, les montmorillonites se présentent sous forme de petites particules dont la plus grande dimension est fréquemment inférieure à un micron (LÉONARD et LOW, 1964). Ces particules sont constituées par l'empilement

(1) Thèse de Doctorat ès Sciences physiques, soutenue à la Faculté des Sciences de Paris, le 23 février 1972.

d'un nombre variable de feuillets élémentaires, de l'ordre de dix pour une argile sodique (MERING, 1946). Ce nombre est d'ailleurs différent suivant la nature des ions qui saturent le minéral (BANIN et LAHAV, 1968). A l'état anhydre, les feuillets sont accolés les uns aux autres mais ils s'écartent en présence d'eau, ce qui rend accessibles les surfaces basales initialement en contact. Celles-ci constituent la surface interne du minéral qui est de l'ordre de 800 m^2/g alors que la surface externe ne représente que 80 m^2/g environ. (Cette dernière correspond aux surfaces basales externes et aux surfaces des bords des feuillets). L'eau adsorbée est répartie sur l'ensemble de ces surfaces et l'utilisation de la diffraction des rayons X permet de mesurer l'écartement entre les feuillets. Nous examinerons en détail les différentes valeurs obtenues, mais d'ores et déjà nous pouvons signaler que la distance de séparation entre deux surfaces basales voisines ne prend pas des valeurs quelconques. Ainsi, dans l'étude que nous avons entreprise, l'hydratation de l'argile est telle que la valeur de l'écartement est de l'ordre de grandeur de un ou deux diamètres moléculaires de l'eau. A ces deux valeurs correspondent des états d'hydratation que nous appellerons par la suite état 1 et état 2.

La structure cristallographique des feuillets élémentaires a été décrite d'une façon très détaillée (GRIM, 1968 ; BROWN, 1961 ; GLAESER, 1953), et doit être représentée suivant le modèle proposé par HOFFMANN et HENDRICKS et non par celui de EDELMAN et FAVEJEE (GLAESER, 1953). Dans ce modèle, le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique centrale. Les tétraèdres (SiO_4) sont orientés de telle sorte qu'un de leurs sommets soit dirigé vers le plan médian du feuillet. La couche octaédrique possède des groupes hydroxyle situés au-dessous des cavités hexagonales délimitées par les atomes d'oxygène de la surface basale. Chaque groupe OH est normalement lié à deux cations trivalents. Cependant, un de ces cations, ou les deux, peuvent être remplacés par un ou deux cations bivalents. Il en résulte une ou deux charges électriques non compensées, et la cavité hexagonale voisine est appelée cavité à une charge, ou cavité à deux charges. La neutralisation électrique est assurée par des cations compensateurs situés à l'aplomb de ces cavités, quand il s'agit de cations monovalents tout au moins (MERING et GLAESER, 1954). Ainsi, tous les cations compensateurs se trouvent distribués sur les surfaces basales des feuillets, la plus grande partie étant située sur la surface interne compte tenu de son importance par rapport à la surface externe. Pour le cation, une cavité hexagonale chargée représente une position qui correspond à un minimum d'énergie potentielle. Sous l'effet de l'agitation thermique, le cation peut être remplacé par un autre, ce qui constitue le processus élémentaire de l'échange d'ions. En outre, quand ce remplacement se fait de proche en proche, il en résulte un mouvement d'ions dont la direction générale est parallèle à la surface. Dans une argile faiblement hydratée (état 1 et état 2), ces mouvements ont lieu sur les surfaces interne et externe ; il s'agit d'une diffusion de surface.

Si de très nombreux travaux détaillés ont été consacrés à l'étude des déplacements des cations par des mesures d'échange d'ions, les mouvements ioniques sur la surface de l'argile n'ont jamais fait l'objet d'analyses approfondies. Nous nous sommes donc proposé d'étudier les mouvements des cations compensateurs sur la surface du minéral. Cependant, les paramètres physiques qui les déterminent dépendent du réseau cristallin et des molécules d'eau adsorbées et il en résulte que leur analyse nécessite la connaissance du phénomène d'hydratation de l'argile. Décrire

ce phénomène, c'est donner à la fois les modalités de son développement et les propriétés physico-chimiques de l'eau fixée sur la surface des feuillets. L'approche expérimentale de ce travail est alors définie. Elle consiste d'une part, à établir les isothermes d'adsorption d'eau et à déterminer les écartements entre les feuillets, d'autre part, à mesurer les coefficients de diffusion des cations compensateurs. Notre but étant de proposer des mécanismes pour décrire l'adsorption de l'eau et la diffusion des cations, la seule considération des résultats expérimentaux n'est pas suffisante. Il importe alors de disposer de renseignements relatifs aux propriétés physiques de la surface du minéral. Comme elles ne sont généralement pas directement accessibles à l'expérience, il faut les évaluer à l'aide de calculs théoriques basés sur des modèles simples, calculs qui constituent un autre aspect de notre travail.

Ce mémoire comprend deux parties. La première est consacrée à l'étude de l'hydratation de la montmorillonite et fait l'objet du chapitre 1, la deuxième se rapporte aux phénomènes de diffusion des cations compensateurs et se trouve exposée dans le chapitre 2 (publié dans le prochain numéro des *Annales agronomiques*).

CHAPITRE 1

ÉTUDE DE L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE SATURÉE PAR DES CATIONS MONOVALENTS

Les propriétés thermiques des suspensions (MOONEY *et al.*, 1952 ; OSTER et LOW, 1964 ; Van OLPHEN, 1965), les propriétés physiques de l'eau adsorbée (LOW, 1961 ; MAMY, 1968) indiquent que les molécules d'eau se trouvent dans un état différent de l'état liquide, appelé par certains, état quasi cristallin (LOW, 1961). De plus, le refroidissement de suspensions à des températures inférieures à 0°C a pour effet de mettre en évidence des états d'hydratation relativement stables (ANDERSON et HOEKSTRA, 1965 ; ANDERSON, 1966 ; ANDERSON, 1968). L'ensemble de ces propriétés a servi de base à des recherches sur la description de l'eau adsorbée. C'est ainsi que différents modèles d'arrangements des molécules d'eau ont été proposés (HENDRICKS et JEFFERSON, 1938 ; MACEY, 1942 ; MAMY, 1968), et que la présence possible de polymères désignés sous le nom de « polywater » a récemment été invoquée (LOW et WHITE, 1970).

Les premières couches d'eau fixées sur l'argile présentent donc des propriétés différentes de celles de l'eau liquide et de la glace et dans ce chapitre, nous nous proposons de préciser ces propriétés tout en analysant les mécanismes qui gouvernent l'évolution de l'hydratation du minéral.

I. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'argile étudiée est la montmorillonite de Camp-Berteau (Maroc) dont la fraction inférieure à 2 μ est extraite par sédimentation.

La saturation par un cation M^+ est obtenue en effectuant des contacts répétés entre la suspension d'argile et une solution du chlorure correspondant. L'argile est

ensuite lavée par centrifugation puis par dialyse dans de l'eau bipermutée. Les argiles biioniques sont préparées par mélange de deux suspensions d'argile monoionique dans les proportions désirées.

La formule structurale est :

$$M^{+}_{0,39}\ [(Al_{1,46},\ Fe^{3+}_{0,15})\ Mg^{2+}_{0,39}]\ (Si_4)O_{10}(OH)_2.$$

Il lui correspond une capacité d'échange de 113 meq/100 g de minéral calciné à 1 000°C. La capacité d'échange mesurée est 116 meq/100 g de minéral calciné à 1 000°C.

Au cours de l'exposé, toutes les teneurs en eau sont exprimées en grammes d'eau pour 100 grammes d'argile séchée à 250°C.

A. — *Isothermes d'adsorption*

1. *Résultats* (fig. 1).

Les isothermes d'adsorption sont obtenues à 20°C sur des poudres maintenues sous une atmosphère dont la pression partielle de vapeur d'eau est connue. Les quantités d'eau fixées sont déterminées par des pesées jusqu'à poids constant (la

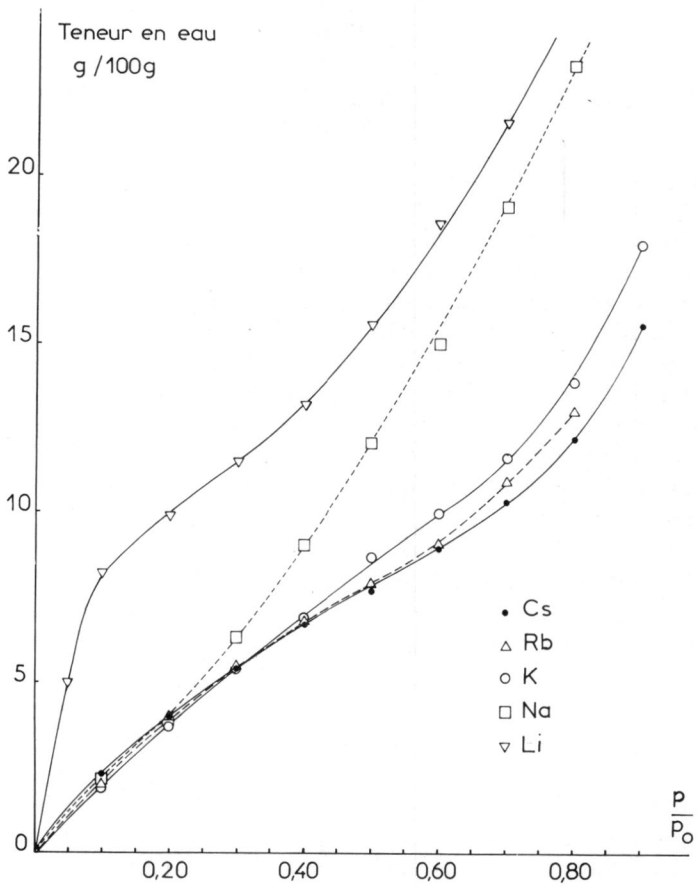


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption d'eau*

constance du poids est vérifiée pendant plusieurs jours). Dans les mêmes conditions les isothermes de désorption montrent un phénomène d'hystérésis pour les argiles sodiques et lithiques.

Conformément à des observations antérieures (MOONEY *et al.*, 1952 *a* ; MOONEY *et al.*, 1952 *b* ; ORCHISTON, 1955 ; MAMY, 1968), les quantités d'eau fixées augmentent dans l'ordre : $Cs^+ < Rb^+ < K^+ < Na^+ < Li^+$. Toutefois, pour des pressions relatives inférieures à 0,3, l'argile césique fixe un peu plus d'eau que les argiles saturées par Rb^+ et K^+.

2. *Analyse des isothermes d'adsorption.*

La forme asymptotique des isothermes et la présence d'un phénomène d'hystérésis caractérisent l'adsorption sur des smectites (MERING, 1964). L'absence de palier comme pour la beidellite, montre que l'on a bien un comportement de minéral à charges octaédriques (GLAESER *et al.*, 1967 ; MERING et PEDRO, 1969). Ne disposant pas de renseignements suffisants pour effectuer une étude détaillée, nous avons choisi d'utiliser une théorie dont la manipulation est assez simple : la théorie de BRUNAUER, EMMETT et TELLER (1938).

BRUNAUER (1945) a décrit cinq types d'isothermes, et ceux représentés sur la figure 1 montrent une évolution du type II vers le type III quand on passe du lithium au césium. La théorie de B. E. T. donne une description générale de ces isothermes sur la base de trois hypothèses :

— Existence d'une adsorption multimoléculaire sans condensation capillaire.

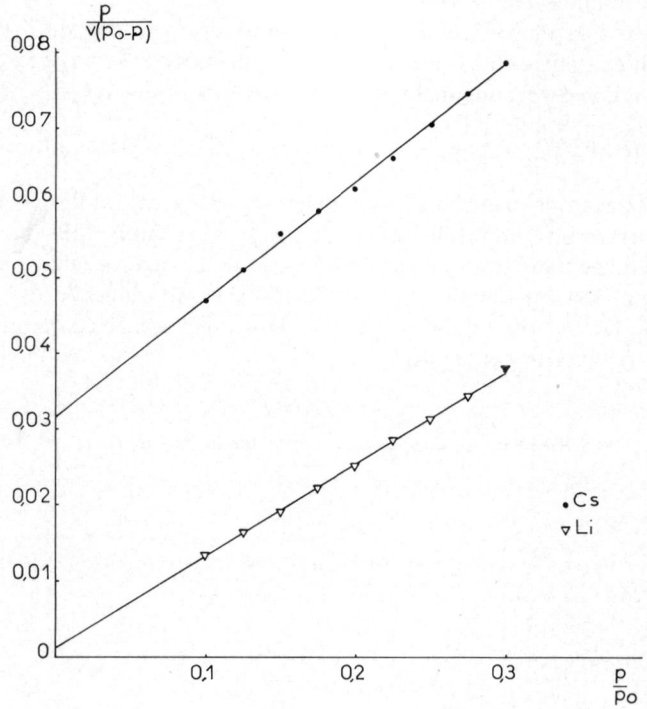


FIG. 2. — *Application de la théorie de B. E. T.*

— Les paramètres qui décrivent l'adsorption de la première couche sont indépendants du nombre de molécules adsorbées. C'est le cas en particulier de l'énergie d'adsorption E_1.

— Les énergies d'adsorption dans les couches superposées à la première sont égales à la chaleur de liquéfaction.

Un calcul conduit dans ces conditions permet d'obtenir une relation entre la quantité d'eau adsorbée, v, et la pression partielle relative de vapeur d'eau p/p_0

$$F = \frac{p}{v(p_0 - p)} = \frac{1}{v_m C} + \frac{C - 1}{v_m C} \cdot \frac{p}{p_0}$$

v_m : volume adsorbé quand la surface est couverte d'une couche monomoléculaire.
C : $\exp [(E_1 - E_L)/RT]$.
E_1 : énergie d'adsorption pour la première couche.
E_L : chaleur de liquéfaction de l'eau : 10,55 kcal mole^{-1}.

La fonction F est en général linéaire pour des pressions relatives inférieures à 0,3 (fig. 2), et la valeur de E_1 peut être obtenue à partir de C alors que v_m permet de calculer la surface S (B. E. T.) si la surface σ occupée par une molécule d'eau est connue. On utilise habituellement la valeur $\sigma = 66$ m^2/mmole. Le tableau 1 donne les valeurs obtenues.

Ces résultats nécessitent plusieurs remarques :

— les isothermes d'adsorption suivent la loi théorique (fig. 2) ;

— les énergies E_1 diffèrent peu suivant la nature du cation ;

— la signification des valeurs de la surface S (B. E. T.) n'est pas simple. En fait, la surface donnée par le calcul correspond à la surface externe des particules d'argile, ajoutée à la moitié de la surface interne, étant donné qu'il y a formation d'une couche d'eau entre deux surfaces solides (Mooney *et al.*, 1952 *a*). En prenant 90 m^2 comme ordre de grandeur de la surface externe, nous avons :

$$S \text{ (B. E. T.)} = \left[90 + \frac{1}{2} SI \right] \text{m}^2/\text{g} \qquad SI = \text{surface interne}$$

Malgré cette transformation, les valeurs de SI sont faibles, comparées à la valeur de la surface interne totale qui est de 720 m^2/g environ (tabl. 1). L'explication doit être recherchée dans la signification de v_m et de la surface moléculaire σ.

Notons que les valeurs de S (B. E. T.) se classent dans l'ordre décroissant : $Na^+ > Li^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$. Ce même classement est aussi donné par Mooney *et al.* (1952 *a*) et Orchiston (1955).

TABLEAU I

Résultats de l'application de la théorie de B. E. T.

	Li^+		Na^+		K^+	Rb^+	Cs^+
	Adsorption	Désorption	Adsorption	Désorption	Adsorption	Adsorption	Adsorption
S (B. E. T.) m^2/g ..	310	326	330	353	280	255	195
E_1 kcal mole^{-1} = E (B. E. T.).....	13,3	12,67	11,12	12,12	11,34	11,37	11,60
SI m^2/g	440	470	480	530	380	330	210

B. — *Diffraction des rayons X*

1. *Mesure des espacements d*001 (fig. 3).

Les diagrammes de diffraction sont obtenus à partir de films orientés résultant de l'évaporation d'une suspension sur une lame de verre. Avant et pendant chaque enregistrement, les films sont maintenus sous une atmosphère dont la pression partielle de vapeur d'eau est fixée. La figure 3 représente les espacements apparents *d*001 en fonction de la nature du cation compensateur et de la teneur en eau de l'échantillon.

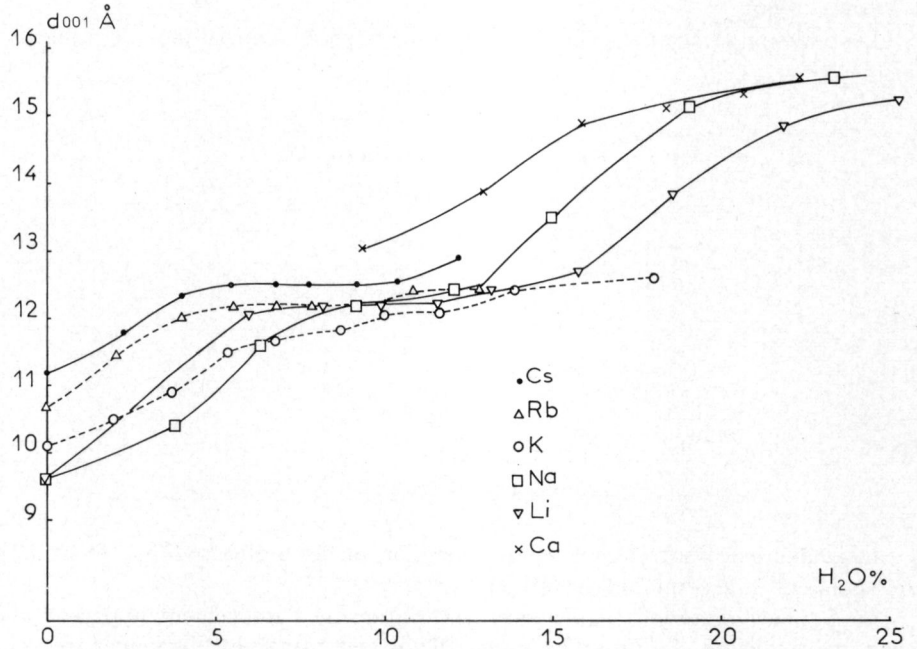


FIG. 3. — *Variations de l'espacement apparent d*001 *en fonction de la teneur en eau*

Ainsi que d'autres auteurs l'ont déjà signalé (MOONEY *et al.*, 1952 *a* ; MOONEY *et al.*, 1952 *b* ; GLAESER et MERING, 1968), les argiles se classent en deux catégories :

— Les argiles saturées par Li^+ et Na^+. L'hydratation se fait en deux étapes avec la formation d'un état qui correspond à une valeur de la distance interfeuillets voisine du diamètre de la molécule d'eau, puis d'un autre état dont la valeur de cette distance est proche du double du diamètre moléculaire de l'eau. Le premier état est appelé « état à une couche », le deuxième « état à deux couches », et nous les appellerons état 1 et état 2.

— Les argiles saturées par K^+, Rb^+ et Cs^+. L'espacement *d*001 est limité à une valeur correspondant à l'état à une couche. Avec le potassium, il faut signaler qu'il est possible d'obtenir un espacement plus grand. Nous avons préparé une argile saturée par le potassium à partir d'une suspension d'argile sodique. Après

lavage et concentration, nous avons mesuré l'espacement sur une pâte exposée successivement à différentes humidités relatives :

$$p/p_0 = 1{,}00 \rightarrow 0{,}98 \rightarrow 0{,}90 \rightarrow 0{,}80 \rightarrow 1{,}00$$
$$d001 = 16\ \text{Å} \rightarrow 15{,}2\ \text{Å} \rightarrow 12{,}7\ \text{Å} \rightarrow 12{,}5\ \text{Å} \rightarrow 12{,}5\ \text{Å}$$

(la dernière valeur 12,5 Å est obtenue après une exposition de 48 heures avec $p/p_0 = 1{,}00$).

Après avoir été légèrement séchée, l'argile K perd en partie ses propriétés de gonflement. Ceci est en accord avec les observations de NORRISH (1954) qui souligne que l'ouverture d'une argile saturée par K^+ dépend de l'« histoire de l'échantillon ». La valeur limite de 12,5 Å est également celle trouvée par HARWARD *et al.* (in MERING et PEDRO, 1969).

Les valeurs caractéristiques des espacements sont données dans le tableau 2.

TABLEAU 2

*Valeurs des espacements d*001 (Å)

	Anhydre	État 1		État 2
		Adsorption	Désorption	
Li^+	9,6	(12,25)	12,40	15,25
Na^+	9,6	(12,25)	12,45	15,50
K^+	10,2	12,50		
Rb^+	10,6	12,40		
Cs^+	11,2	12,50		

Les valeurs de *d*001 obtenues par adsorption sur les argiles sodiques et lithiques correspondent à des états interstratifiés.

La figure 3 représente également la variation de l'espacement apparent *d*001 pour l'argile calcique. La propriété essentielle de cette argile est de gonfler très rapidement avec l'établissement d'un état correspondant à l'état 2 (*d*001 = 15,6 Å). Ceci a déjà été observé par MERING (1946) et GLAESER (1953) qui ont attribué ce comportement à la formation d'hexahydrates.

2. *Écartement des feuillets et quantité d'eau adsorbée.*

Pour les teneurs en eau inférieures à celles correspondant à la formation d'un état d'hydratation homogène (*d*001 = 12,4 Å, ou 15,5 Å avec des séries de réflexions rationnelles), nous sommes en présence de systèmes interstratifiés. L'analyse permettant d'obtenir leur composition n'est pas facile en raison du faible nombre de réflexions basales obtenues (2 à 4). Dans ces conditions, la seule méthode qui donne des renseignements est celle de HENDRICKS et TELLER (in BROWN, 1961). Ces auteurs ont établi des formules permettant de calculer l'effet d'un mélange de deux types de feuillets caractérisés par des espacements différents, sur l'intensité des phénomènes de diffraction. L'application de ces formules ne conduit certainement pas

à une évaluation précise des proportions des deux constituants. Cependant, les renseignements qu'elle fournit, même approchés, nous seront très utiles. La figure 4 représente la proportion d'espacements correspondant à l'état 1 en fonction de la teneur en eau pour les différents cations. La théorie de B. E. T. s'applique pour des pressions relatives de vapeur d'eau inférieures à 0,3. Les caractéristiques du minéral adsorbant qui en sont déduites ne peuvent donc correspondre qu'à un état en équilibre avec une pression relative au plus égale à 0,3. Si q est la teneur en eau de l'argile pour $p/p_0 = 0{,}3$, les résultats de cette théorie se rapportent à l'argile dans un état où elle est hydratée par q grammes d'eau au plus. Il en est ainsi car les propriétés de l'argile sont modifiées par l'adsorption d'eau. Le problème se pose donc en termes particuliers, car habituellement cette théorie s'applique à des adsorbants qui ne sont pas modifiés par l'adsorbat.

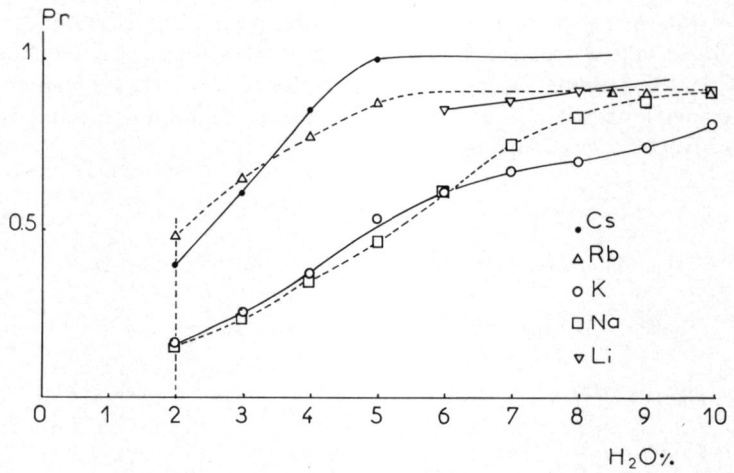


FIG. 4. — *Variations de la proportion Pr de feuillets écartés, en fonction de la teneur en eau*
L'écartement correspond à l'état 1

Considérons l'exemple de l'argile saturée par le césium. Nous avions SI = 210 m²/g. La teneur en eau correspondant à $p/p_0 = 0{,}3$ est 5,5 g/100 g. En admettant qu'il y a une couche d'eau complète sur la surface externe, ce qui correspond à 2,5 g d'eau, il reste 5,5 — 2,5 = 3,0 g/100 g pour la surface interne. La figure 4 nous indique que tous les feuillets sont écartés à la teneur en eau de 5,5 p. 100. La vraie surface interne est donc de 720 m²/g. La quantité de cations compensateurs sur la surface interne est de 0,93 meq/g en supposant une répartition uniforme des cations entre les surfaces interne et externe. Ceci conduit à une proportion de 1,8 molécule d'eau par cation. Enfin, si nous avions utilisé une surface spécifique convenable, nous aurions dû trouver :

$$\text{SI} = 720 \text{ m}^2/\text{g} \qquad \text{et} \qquad \text{S (B. E. T.)} = \frac{720}{2} + 90 = 450 \text{ m}^2/\text{g}.$$

Comme $v_m = 53{,}6$ mg/g, il aurait fallu utiliser une surface σ de 151 m²/mmole.

Dans le tableau 3, les chiffres correspondant à ce dernier calcul sont donnés pour tous les cations et pour $p/p_0 = 0{,}3$.

Deux faits sont particulièrement importants :

— Pour une pression relative donnée, l'écartement des feuillets et l'hydratation des surfaces internes dépendent de la nature des cations compensateurs. En particulier, l'écartement des feuillets est possible pour un nombre de molécules d'eau variable et diminuant suivant l'ordre : $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$. Il en résulte que les espaces interlamellaires correspondants sont plus ou moins remplis, alors que les feuillets sont écartés. Les molécules d'eau ne recouvrent donc pas la totalité de la surface, mais constituent des îlots auxquels le nom de « cales » a été donné (MAMY, 1968).

— L'application de la théorie de B. E. T. aux argiles gonflantes comme la montmorillonite ne permet pas d'obtenir une mesure de la surface interne. En effet, une molécule d'eau révèle une surface différente de sa surface spécifique et variable suivant la saturation ionique de l'argile. Par exemple : pour l'argile césique, la surface révélée est de 151 m^2/mmole ; au contraire, pour l'argile sodique elle est de 62,4 m^2/mmole, valeur très voisine de la surface spécifique de 66 m^2/mmole. Dans ces conditions, le volume v_m ne correspond plus à une couche monomoléculaire au sens géométrique. Il indique plutôt la quantité minimum d'eau adsorbée qui permet l'écartement des feuillets.

TABLEAU 3

Données obtenues à partir des valeurs du taux de feuillets écartés

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
Teneur en eau totale p. 100	11,5	6,4	5,5	5,5	5,5
Quantité d'eau sur la surface interne	9	3,9	3	3	3
Taux de feuillets écartés	0,95	0,65	0,53	0,87	1,0
Surface interne accessible (m^2/g)	685	468	380	626	720
Nombre de cations correspondant aux surfaces accessibles (meq/g)	0,885	0,605	0,493	0,806	0,93
Nombre de molécules d'eau par cation situé sur les surfaces internes (1)	5,65	3,6	3,38	2,08	1,8

(1) Ce nombre se rapporte à la totalité des molécules d'eau et n'indique pas le nombre de molécules qui hydratent effectivement les cations.

C. — *Conclusion du paragraphe I*

Il apparaît que l'adsorption de l'eau dépend très étroitement de la nature des cations compensateurs. Cette dépendance affecte à la fois les quantités d'eau fixées et les modalités de l'adsorption. Trois résultats sont très importants :

— Les feuillets s'écartent pour des quantités d'eau adsorbées sur la surface interne variables suivant le cation et inférieures à la quantité nécessaire au remplissage de l'espace interlamellaire. De plus, l'importance de l'écartement dépend de la composition ionique de l'argile comme le montrent les valeurs du taux de

feuillets écartés. Les cations compensateurs jouent donc un rôle primordial dans le mécanisme de la formation de l'état 1.

— Le formalisme de la théorie de B. E. T. s'applique aux isothermes d'adsorption mais conduit à des valeurs généralement inexactes pour la surface de l'argile. Cette contradiction fait que l'application de cette théorie n'est peut être pas justifiée.

— Il peut exister plusieurs phases d'hydratation. Avec Li^+ et Na^+, l'état 1 est suivi de l'établissement de l'état 2, alors qu'avec Rb^+ et Cs^+, il constitue une limite de l'adsorption de l'eau. Pour l'argile saturée par le potassium, l'une ou l'autre de ces situations est possible. Ce sont les propriétés de l'état 1 qui conditionnent l'évolution du système argile-eau.

Pour comprendre ces résultats il faut essayer de décrire les mécanismes de l'hydratation qui régissent la formation des états 1 et 2. Il est alors important de connaître les variations d'énergie qui accompagnent les transformations subies par l'espace interlamellaire lors des passages de l'état anhydre aux états hydratés. Ces variations sont dues aux modifications, au cours de l'adsorption, des interactions entre le réseau cristallin, les molécules d'eau et les cations. Dans ces conditions, il nous importe donc d'analyser les propriétés physico-chimiques des états anhydres et hydratés dont les éléments essentiels sont représentés par la distribution et l'énergie des cations compensateurs et des molécules d'eau.

II. — ÉTUDE DE L'ÉTAT ANHYDRE

Notre but étant d'analyser les propriétés de l'espace interlamellaire concernées par le phénomène d'hydratation de l'argile, nous avons limité la description de l'état anhydre à l'examen de la position et de l'énergie des cations compensateurs, et à l'évaluation de l'énergie de cohésion interfeuillets. La position des cations est définie si nous connaissons leur emplacement dans un plan parallèle à la surface du feuillet et leur cote par rapport à celui-ci. Nous pouvons obtenir ces deux informations à l'aide des caractéristiques de la distribution des cations sur les surfaces basales et grâce à l'étude de leur énergie potentielle exprimée en fonction de leur cote par rapport au feuillet.

A. — Distribution des cations compensateurs dans la montmorillonite

1. — *Distribution et population ionique des surfaces basales*

a) *Argiles monoioniques.*

A certains égards, la distribution des cations monovalents est assez simple. En effet, malgré le rôle que peuvent jouer les atomes d'oxygène de la surface, les cations doivent occuper les positions les plus proches des substitutions isomorphiques. Quand celles-ci sont dans la couche octaédrique, la meilleure position est sur l'axe de la cavité hexagonale voisine d'une substitution. La distribution des cations monovalents correspond donc à la distribution des cavités hexagonales chargées (cavités voisines d'une ou de deux substitutions).

Avec des cations bivalents, la distribution devient plus difficile à décrire. Un certain nombre de cavités hexagonales sont voisines de deux substitutions (GLAESER, 1953 : MERING et GLAESER, 1967), et sont occupées en priorité. Leur nombre est limité, et les autres cations doivent alors neutraliser, soit deux charges du même feuillet, soit deux charges situées sur des feuillets voisins. Dans ce cas, la distribution des cations bivalents dépend aussi de la distribution des cavités hexagonales chargées, mais d'une façon beaucoup moins directe que pour les cations monovalents.

b) *Argiles biioniques.*

Dans une argile biionique, les cations sont uniformément distribués s'ils sont monovalents. Par contre, la situation n'est pas aussi simple quand l'argile est saturée à la fois par des cations monovalents et des cations bivalents. Les mesures de viscosité, de densité optique et de gonflement, effectuées sur des suspensions d'argiles biioniques (Na-Ca) en présence de sels libres, semblent montrer que les cations Na^+ et Ca^{++} ne sont pas uniformément répartis (SHAINBERG et OTHO, 1968 ; MCATEE, 1956 ; MCNEAL *et al.*, 1966 ; O'CONNOR et KEMPER, 1969 ; MCNEAL, 1970). Pour des argiles peu hydratées, au contraire, l'étude de la variation de l'espacement interlamellaire en fonction de la composition ionique conduit à deux distributions possibles (GLAESER, 1953). Une argile (Na-Ca) exposée à une pression relative $p/p_0 = 0{,}05$ serait constituée par un mélange de feuillets saturés par Na^+ et de feuillets saturés par Ca^{++} quand la proportion de calcium est supérieure à 30 p. 100 de la capacité d'échange. Pour des proportions inférieures, les cations seraient uniformément répartis. Il y aurait également une répartition uniforme pour des teneurs en eau plus élevées ($p/p_0 = 0{,}40$) quelle que soit la quantité de calcium présente.

2. — *Description de la distribution des cations monovalents sur les surfaces basales*

La distribution des cations monovalents dépend de la distribution des substitutions isomorphiques qui est différente selon le type de silicate. Dans les micas, cette distribution est ordonnée (GATINEAU et MERING, 1966), dans la montmorillonite au contraire, il est admis que c'est une distribution au hasard (GLAESER, 1953 ; MERING et GLAESER, 1967). Utilisant cette idée, nous nous proposons de déterminer certaines caractéristiques de la distribution des cavités hexagonales chargées. En particulier, nous devons répondre à deux questions :

— Quelle est la probabilité de trouver une cavité hexagonale chargée à une certaine distance d_i d'une autre cavité chargée ?

— Quelle est la probabilité de trouver plusieurs cavités hexagonales chargées et voisines formant un ensemble isolé ?

Les réponses à ces questions sont importantes, car elles permettent de définir les modes d'arrangements des molécules d'eau et les chemins de diffusion. Nous avons utilisé une méthode de calcul numérique dont les détails sont donnés dans l'annexe I, et dont le principe est le suivant. La connaissance de la capacité d'échange de l'argile indique qu'il y a x cations monovalents par maille, soit pour 4 cavités hexagonales. La probabilité pour qu'une cavité hexagonale soit occupée par un cation monovalent est donc $p = x/4$ (rappelons que nous appelons ce type de cavité, cavité chargée). Si nous considérons un ensemble de N cavités hexagonales, nous obtiendrons une image de la distribution des cavités chargées en prenant au hasard $p \cdot N$ cavités. Nous pouvons alors calculer les caractéristiques de cette distribution (distance entre cavités chargées...). Les caractéristiques de la distribution vraie sont estimées par la moyenne des caractéristiques des distributions particulières obtenues à l'aide de 1 000 tirages au hasard. Les résultats sont donnés dans les tableaux 4 et 5 et illustrés par la figure 5.

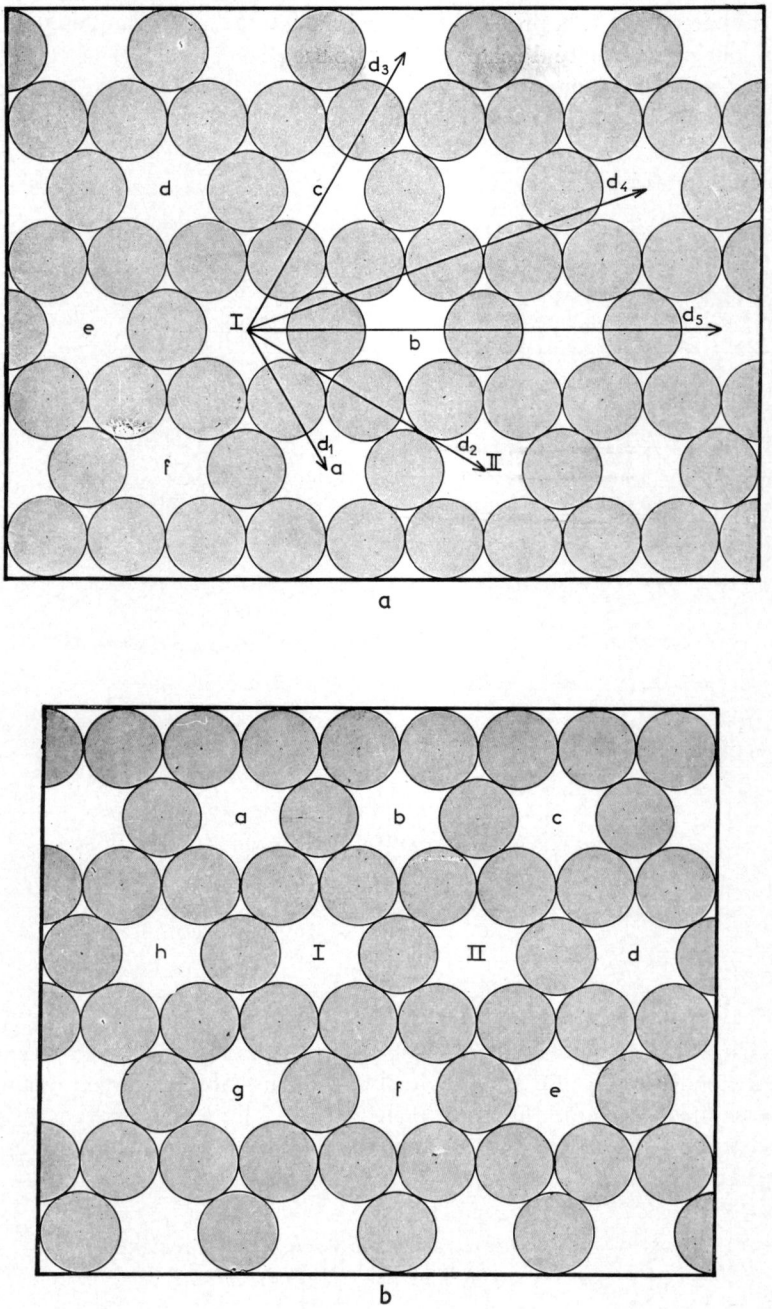


FIG. 5. — *Positions relatives des cavités hexagonales*

Étant donné une cavité chargée prise au hasard, le tableau 4 indique la probabilité d'avoir la cavité chargée la plus proche à la distance d_i. Exemple (fig. 5 *a*) : soit une cavité chargée I, la probabilité d'avoir la cavité chargée la plus proche en II est 0,190 pour une capacité d'échange de 115,6 meq/100 g (dans ce cas les cavités *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f* ne sont pas chargées).

TABLEAU 4

Probabilités des différentes distances entre les cavités hexagonales chargées

meq/100 g de minéral calciné	Distance d_i						
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7
115,6	0,693	0,190	0,075	0,035	0,010	—	—
87,3	0,515	0,230	0,130	0,094	0,012	0,010	—
73,5	0,440	0,244	0,144	0,120	0,022	0,015	—
70,0	0,425	0,243	0,144	0,133	0,024	0,017	0,010
43,4	0,308	0,185	0,156	0,178	0,041	0,055	0,034
20,2	0,127	0,073	0,086	0,217	0,070	0,079	0,096

TABLEAU 5

Probabilités des ensembles isolés de n cavités hexagonales chargées

meq/100 g de minéral calciné	*n*				
	1	2	3	4	5 et plus
115,6	0,307	0,421	0,217	0,047	0,008
87,3	0,485	0,389	0,106	0,018	0,002
78,5	0,516	0,364	0,095	0,015	0
70,0	0,575	0,325	0,085	0,015	0
43,4	0,740	0,217	0,040	0,003	0
20,2	0,873	0,125	0,002	0	0

Un ensemble de cavités chargées est dit isolé quand cet ensemble est entouré de cavités non chargées. Le tableau 5 donne la probabilité d'avoir un ensemble isolé de *n* cavités. Exemple (fig. 5 *b*) : l'ensemble $n = 2$ a une probabilité de 0,421 pour une capacité d'échange de 115,6 meq/100 g (ici, les cavités *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* et *h* ne sont pas chargées).

3. — *Distribution relative des cations monovalents sur les surfaces de deux feuillets voisins*

Les deux surfaces qui limitent l'espace interlamellaire sont désignées par FI et FS. Étant donné un cation C sur la surface FI, il est utile de connaître la répartition des cations sur la surface FS au voisinage de C. Pour cela, il faut déterminer

la disposition relative des cavités hexagonales sur les surfaces FI et FS, ce qui impose de définir le mode de superposition des feuillets. Des travaux de diffraction électronique (MERING et OBERLIN, 1967) ont montré que l'empilement des feuillets se faisait avec des rotations autour d'un axe perpendiculaire aux feuillets, et qu'en aucun cas il n'y avait superposition des cavités hexagonales. Par conséquent, au-dessus d'une cavité hexagonale sur la surface FI, il peut y avoir n'importe quelle partie de la surface FS à l'exclusion d'une autre cavité hexagonale. Il en résulte un nombre infini de configurations surface FI — surface FS, dont la manipulation est impossible. Il faut donc choisir un modèle de superposition locale. Pour des raisons de simplicité nous avons été conduit à utiliser le modèle représenté sur la figure 6 : au-dessus d'une cavité hexagonale sur la surface FI il y a trois atomes d'oxygène appartenant à la surface FS. Il faut souligner qu'il s'agit évidemment d'une représentation idéalisée de la réalité.

Les cavités hexagonales sur la surface FS se classent suivant la distance qui les sépare de la cavité hexagonale C sur la surface FI : 3 cavités à D_1, 3 à D_2, 6 à D_3, etc. Les distances D_i représentent les distances entre les axes des cavités hexagonales (fig. 6).

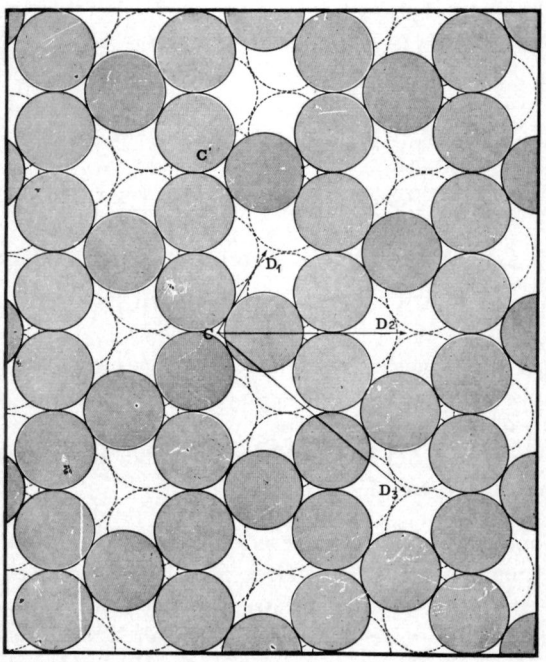


FIG. 6. — *Positions relatives des cavités hexagonales appartenant à deux feuillets voisins.*
Les cercles en traits discontinus représentent les atomes d'oxygène de la surface FI et les cercles de couleur grise correspondent aux atomes d'oxygène de la surface FS.

Compte tenu de la probabilité p d'occupation d'une cavité hexagonale par un cation monovalent, l'entourage sur la surface FS de la cavité C est en moyenne de 3 p cations à D_1, 3 p à D_2, 6 p à D_3, etc. En ne considérant que les trois premières

catégories de cavités hexagonales sur la surface FS, il y a en moyenne 12 p cations au voisinage de la cavité C (soit 2,4 cations pour $p = 0{,}2$). De plus, il est utile de connaître la probabilité des configurations qui font intervenir les cavités les plus proches (à la distance D_1). En effet, nous aurons l'occasion de voir que la présence ou l'absence de cations dans ces dernières conditionne en partie l'état des molécules d'eau qui hydratent le cation situé en C. Dans la mesure où les substitutions isomorphiques d'un feuillet ne dépendent pas des substitutions des feuillets voisins, on peut admettre que les distributions sur les surfaces FI et FS sont indépendantes. Dans ces conditions, les probabilités cherchées sont :

Nombre de cations dans les cavités à D_1	0	1	2	3
Probabilités	$(1-p)^3$	$3p(1-p)^2$	$3p^2(1-p)$	p^3

Soit maintenant sur la surface FI deux cavités hexagonales chargées situées à la distance d_1 l'une de l'autre (cavités C et C', fig. 6). Les cavités hexagonales sur la surface FS les plus proches (à D_1) sont au nombre de 5. D'une façon générale, s'il y a F cavités à D_1 sur la surface FS, la probabilité d'avoir un nombre x ($x \leqslant F$) de cations situés à la distance D_1 est :

$$\frac{F!}{x!\,(F-x)!} \cdot p^x\,(1-p)^{(F-x)}.$$

B. — Énergie potentielle des cations compensateurs

L'expression de l'énergie potentielle d'un cation est la suivante :

$$WCA = WR + \overline{Wrep} = f(CP) \qquad (1)$$

où

WR = énergie d'interaction entre le cation compensateur et le réseau.
$\overline{Wrep}$ = énergie moyenne de répulsion entre un cation et les autres cations qui l'entourent.
CP = cote du cation défini par rapport au plan passant par les centres des atomes d'oxygène de la surface (fig. 7).

Il nous faut donc entreprendre une étude quantitative ou au moins semi-quantitative de ces énergies. Parmi les difficultés rencontrées, les plus importantes proviennent de la présence d'une grande surface, qui nécessite des descriptions globales, et du grand nombre de paramètres qu'il faut envisager simultanément. Pour réaliser cette étude, il est donc absolument nécessaire de définir des modèles. La charge négative du réseau par exemple, a déjà été traitée, soit comme une charge ponctuelle (Shainberg et Kemper, 1966), soit comme un anion halogéné (Kittrick, 1966 ; Kittrick, 1969). Dans ce travail, nous avons essayé de décrire le minéral avec un peu plus de détails en proposant d'autres modèles.

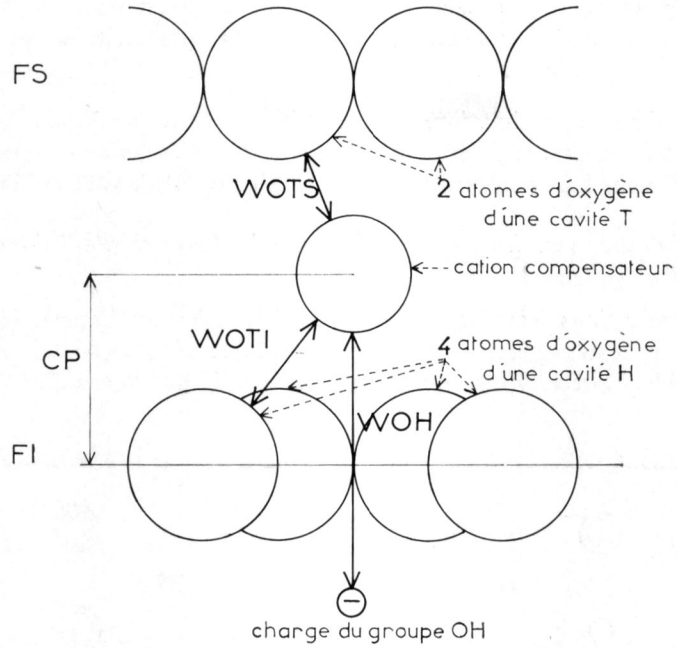


FIG. 7. — *Définition des termes énergétiques relatifs à WR*

1. — *Les interactions entre le réseau et les cations compensateurs*

En premier lieu, le réseau doit ses propriétés aux substitutions isomorphiques qui sont à l'origine d'un excès de charge électrique négative. Cependant, la présence de paires d'électrons libres sur les atomes d'oxygène de la surface du feuillet doit être prise en considération. En effet, les électrons libres jouent un rôle important dans la détermination des propriétés de certaines molécules (LENNARD-JONES et POPLE, 1951), et il est possible qu'il en soit ainsi pour les propriétés de l'argile.

Considérons un espace interlamellaire limité par les surfaces basales de deux feuillets voisins désignés par FI et FS (fig. 7). L'énergie WR peut s'écrire :

$$WR = WFI + WFS \qquad (2)$$

où WFI et WFS représentent les contributions des réseaux des feuillets FI et FS.

Soit un cation situé en face d'une cavité hexagonale chargée appartenant au feuillet FI. Nous avons :

$$\begin{aligned} WFI &= WOH + WOTI \\ WFS &= WOH' + WOTS \end{aligned} \qquad (3)$$

avec :

WOH = énergie du cation dans le champ électrique dû à une substitution isomorphique située dans le feuillet FI.

WOH' = énergie du cation dans le champ électrique dû à une substitution isomorphique située dans le feuillet FS.

WOTI = énergie du cation dans le champ électrique dû aux six atomes d'oxygène de la cavité hexagonale chargée.

WOTS = énergie du cation dans le champ électrique dû aux trois atomes d'oxygène du feuillet FS situés en face de la cavité hexagonale chargée du feuillet FI.

En première approximation, nous négligeons le terme WOH' en raison de l'éloignement de la charge du feuillet FS et de l'effet d'écran des atomes d'oxygène de celui-ci. Il nous faut donc exprimer les énergies WOH, WOTI et WOTS.

a) *Énergie du cation dans le champ électrique dû à la charge résultant d'une substitution isomorphique* (*WOH*).

Les substitutions isomorphiques étant distribuées au hasard, la probabilité d'avoir une cavité hexagonale (donc un groupe OH) située près de deux substitutions est assez faible. En conséquence, nous n'avons étudié que le cas d'une substitution isolée.

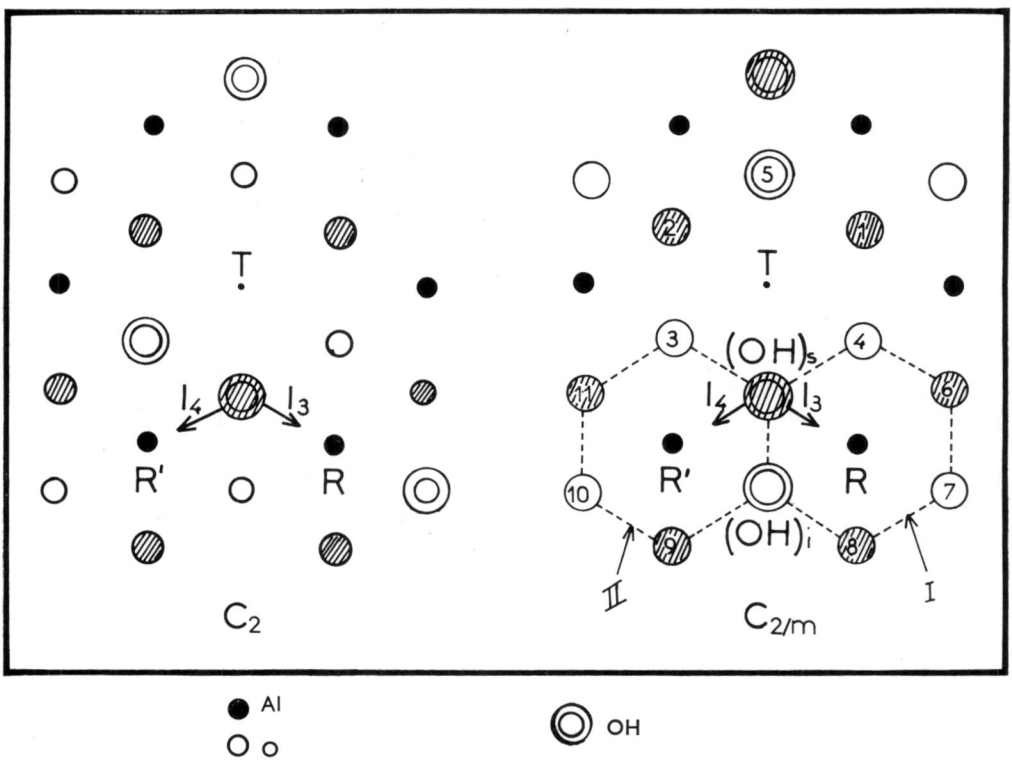


FIG. 8. — *Arrangement des atomes d'aluminium vu en projection sur le plan médian de la couche octaédrique*
Les cercles hachurés représentent les projections des atomes ou des groupes OH situés au-dessus du plan médian.

La description géométrique du système nécessite la connaissance du groupe de symétrie du feuillet. La figure 8 représente en projection sur le plan médian de la couche octaédrique, les deux arrangements possibles des atomes d'aluminium : l'arrangement holoèdre (groupe de symétrie C_{2}/m) et l'arrangement hémièdre (groupe

de symétrie C_2). Ce dernier correspond à la montmorillonite du Wyoming. Pour la montmorillonite de Camp-Berteau, le choix n'est pas certain. La microdiffraction électronique ne permet pas de répondre (OBERLIN et MERING, 1962), et l'étude des propriétés de l'argile biionique (Na—Ca) est insuffisante pour distinguer le groupe de symétrie C_2, d'un mélange statistique des deux groupes de symétrie (GLAESER, 1953 ; MERING et GLAESER, 1954). Compte tenu de cette incertitude, notre choix a été guidé par la recherche du système le plus simple à décrire. De ce point de vue, le groupe de symétrie C_2/m a été retenu. Nous pouvons donc définir le modèle suivant : un groupe OH situé près d'une substitution isomorphique isolée de telle sorte que la position de chaque atome corresponde au groupe de symétrie C_2/m.

Utilisant ce modèle, nous pouvons alors décrire la distribution spatiale de la charge électrique résultant d'une substitution isomorphique. Il nous sera ensuite possible de déterminer le champ électrique correspondant et par conséquent, d'évaluer l'énergie WOH. Dans ces conditions, il est nécessaire de pouvoir obtenir une description du groupe OH et à cet effet, nous avons choisi de le décrire à l'aide d'orbitales moléculaires, suivant une méthode déjà utilisée pour l'étude de la molécule d'eau (POPLE, 1950 ; BADER et JONES, 1963). Il faut alors définir cinq orbitales (fig. 9), chacune étant occupée par deux électrons : φ_1 pour la liaison OH, φ_2, φ_3 et φ_4 pour les paires d'électrons libres, et φ_5 pour les électrons (1*s*) de l'atome d'oxygène. Dans ce qui suit, nous ne tiendrons pas compte de φ_5 car les électrons (1*s*) doivent peu contribuer aux propriétés de OH comme c'est le cas pour la molécule d'eau (MURREL *et al.*, 1966). La description recherchée repose donc sur la détermination des paramètres suivants :

— les paramètres d'hybridation des orbitales φ_i,
— la polarité de la liaison OH,
— la longueur OH,
— la charge portée par le groupe OH : q_{OH},
— l'angle fait par la direction OH et le plan (a, b) : $\theta - \frac{\pi}{2}$, (voir fig. 9).

Tous les calculs correspondants ainsi que les valeurs de WOH sont donnés dans l'annexe II.

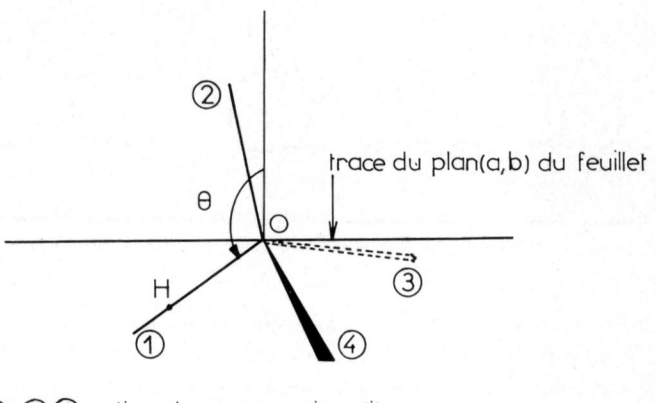


FIG. 9. — *Directions des orbitales moléculaires du groupe OH*

b) *Énergie du cation dans le champ électrique dû aux atomes d'oxygène de la surface.*

Sur la surface du feuillet, les atomes d'oxygène délimitent des cavités hexagonales et chacun d'eux est lié à deux atomes de silicium. La nature de la liaison Si—O n'est pas très bien connue et, d'après PAULING (1960), l'oxygène contribue le plus souvent à cette liaison avec deux électrons. L'atome d'oxygène conserve deux paires d'électrons libres dont le domaine de localisation est dirigé vers l'espace interlamellaire. Pour étudier le rôle de ces électrons, nous supposerons que le champ électrique dû au silicium est compensé par les atomes d'oxygène et que le champ électrique des atomes de surface n'est dû qu'aux deux paires d'électrons libres.

Dans la structure idéale du feuillet, les tétraèdres (SiO_4) sont arrangés suivant une symétrie hexagonale. Il n'en est pas ainsi pour un certain nombre de minéraux tels que les micas et la kaolinite où des distorsions entraînent une disparition de cette symétrie (FARMER et RUSSEL, 1964 ; GRIM, 1968). Il est possible que la montmorillonite présente ce genre de défaut, mais, ne disposant pas d'observations expérimentales à ce sujet, nous prendrons le modèle suivant : les atomes sont assimilés à un noyau de charge + 4 associé à deux paires d'électrons libres et sont disposés selon une symétrie hexagonale. Il est évident que ce modèle ne peut pas être utilisé pour un minéral dont les substitutions isomorphiques sont localisées dans la couche tétraédrique.

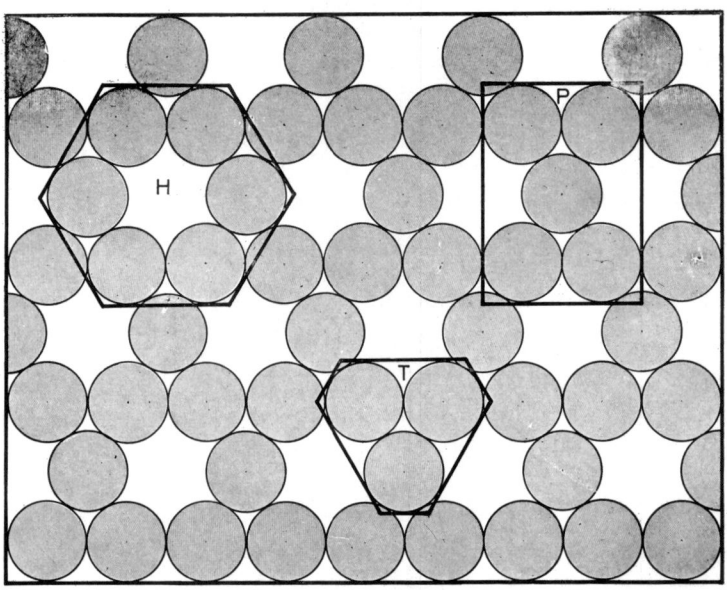


FIG. 10. — *Différents groupements d'atomes d'oxygène sur la surface du feuillet*

Pour décrire le rôle des atomes d'oxygène, il est commode de les grouper en tenant compte de certains aspects topographiques de la surface. La figure 10 représente trois groupements d'atomes dont les champs électriques sont différents et que nous avons appelés cavité H, cavité T et groupe P. Les énergies correspondantes sont calculées dans l'annexe III.

2. — *Énergie de répulsion entre les cations*

Les interactions entre cations appartenant au même feuillet peuvent être négligées. En effet, étant donné qu'en moyenne tous les cations occupent la même cote, ils se trouvent tous dans le même plan. Les seules forces non nulles sont dans ce plan, mais leur résultante est nulle du fait de l'entourage symétrique d'un cation (la symétrie doit évidemment être envisagée d'un point de vue statistique).

Nous avons vu comment décrire l'entourage d'un cation situé sur la surface FI par des cations situés sur la surface FS. Nous sommes ainsi conduit à envisager un certain nombre de configurations caractérisées par des probabilités P_i. Il est possible de décrire la variation d'énergie potentielle du cation en fonction de sa position, pour chacune des configurations (nous rappelons que le cation est sur l'axe de la cavité hexagonale chargée et que sa position est repérée par la cote CP par rapport au plan passant par les centres des atomes d'oxygène de la surface. Ce plan est appelé plan de référence). Pour chaque configuration, la position d'équilibre correspondant au minimum d'énergie potentielle est différente. Étant donné que ces configurations sont distribuées dans l'espace interlamellaire, la détermination expérimentale de la position d'équilibre donne une valeur moyenne de la cote. Il faut donc trouver une expression de cette valeur moyenne.

Pour chaque configuration, l'énergie du cation est :

$$WCA_i = WR + (Wrep)i$$

WR : énergie d'interaction avec le réseau = WFI + WFS. WR est toujours représenté par la même fonction analytique de la cote CP quelle que soit la configuration i.
(Wrep) i : énergie de répulsion entre les cations pour la configuration i.

L'énergie moyenne WCA correspondant à l'ensemble des configurations est :

$$WCA = \sum_i Pi\ [WR + (Wrep)i] = WR + \sum_i Pi\ (Wrep)i\ ; \quad \left(\sum_i Pi = 1\right)$$

Une estimation de la cote moyenne pour la position d'équilibre est alors donnée par la valeur de CP qui correspond au minimum de WCA.

La détermination de l'énergie moyenne de répulsion $\overline{Wrep} = \sum_i Pi\ (Wrep)i$, s'effectue en utilisant les résultats du paragraphe II A 2.

Considérons un cation C situé dans une cavité hexagonale chargée sur la surface FI. Soient N_1 cavités hexagonales sur la surface FS à la distance R_1 du cation C, .. Nj cavités sur la surface FS à la distance Rj (à la distance Rj correspond Dj, la distance entre les axes des cavités). Si p est la probabilité élémentaire d'avoir une cavité hexagonale chargée, donc un cation, on montre que l'énergie moyenne de répulsion est :

$$\overline{Wrep} = Z_C \cdot p \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{Nj}{Rj}$$

où Z_C est la charge du cation.

Étant donné que la répulsion due aux cations devient faible pour les distances supérieures à R_3 on a :

$$\overline{Wrep} \simeq Z_C^2 \cdot p \cdot \left(\frac{3}{R_1} + \frac{3}{R_2} + \frac{6}{R_3}\right)$$

Cette expression correspond à un nombre moyen de cations sur la surface FS de :

$$p\ (3 + 3 + 6) = 2{,}4 \qquad \text{pour } p = 0{,}20$$

3. — *Calcul de l'énergie potentielle des cations compensateurs*

D'après les relations (1) et (2), l'énergie potentielle d'un cation compensateur a pour expression :

$$WCA = WR + \overline{Wrep} = WFI + WFS + \overline{Wrep} = f(CP).$$

Au paragraphe A nous avons défini un modèle de superposition des feuillets tel qu'il y ait trois atomes d'oxygène (cavité T) en face d'une cavité hexagonale (cavité H). Dans ces conditions, compte tenu des formules (3) nous avons :

WFI = WOH + Énergie d'un cation dans le champ électrique d'une cavité H (= WOTI).

WFS = Énergie d'un cation dans le champ électrique d'une cavité T (= WOTS).

Les calculs des énergies développés dans les annexes II et III montrent que plusieurs paramètres restent indéterminés. Ce sont :

— la charge q_{OH} du groupe OH situé près d'une substitution isomorphique,
— l'angle β fait par les directions des orbitales des paires d'électrons libres des atomes d'oxygène de la surface.

a) *Étude de l'argile saturée par le sodium.*

Les paramètres q_{OH} et β sont obtenus par un ajustement basé sur l'observation suivante. PEZERAT et MERING (1967) ont mesuré la cote du sodium par rapport au feuillet dans une montmorillonite sodique anhydre et ont trouvé une valeur

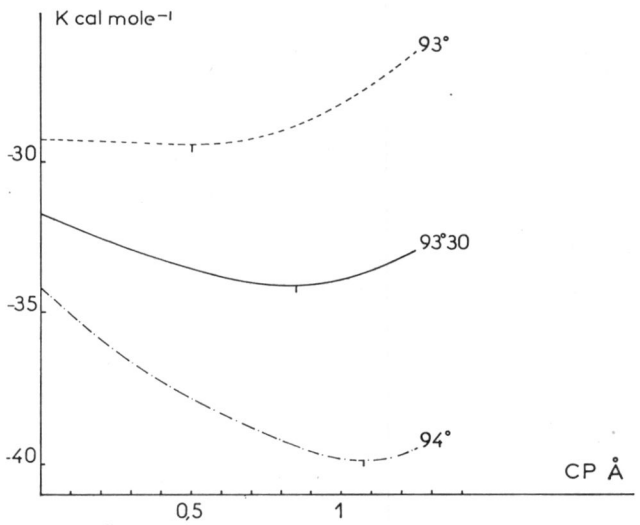


FIG. 11. — *Énergie potentielle de* Na^+ *pour différentes valeurs de l'angle* β

CP = 0,85 Å. La charge q_{OH} et l'angle β doivent donc être tels que l'énergie potentielle du cation sodium soit minimum pour cette valeur de CP. L'application de cette méthode est illustrée par les figures 11 et 12 où WCA = f(CP) est représentée :

— figure 11 : $q_{OH} = -1$; $\beta = 93°, 93° 30', 94°$; $l = 3$ Å ;
— figure 12 : $q_{OH} = -0{,}58, -0{,}79, -1$; $\beta = 93° 30'$; $l = 3$ Å.

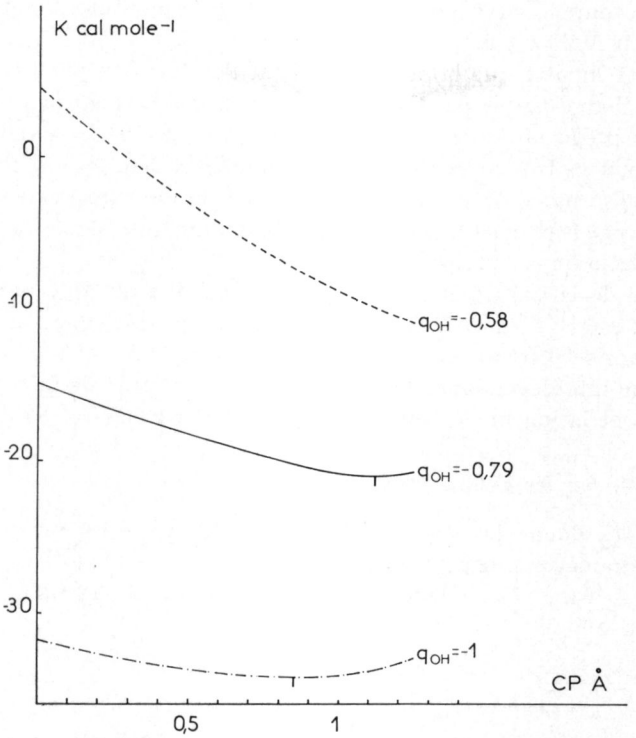


FIG. 12. — *Énergie potentielle de* Na^+ *pour différentes valeurs de la charge* q_{OH}

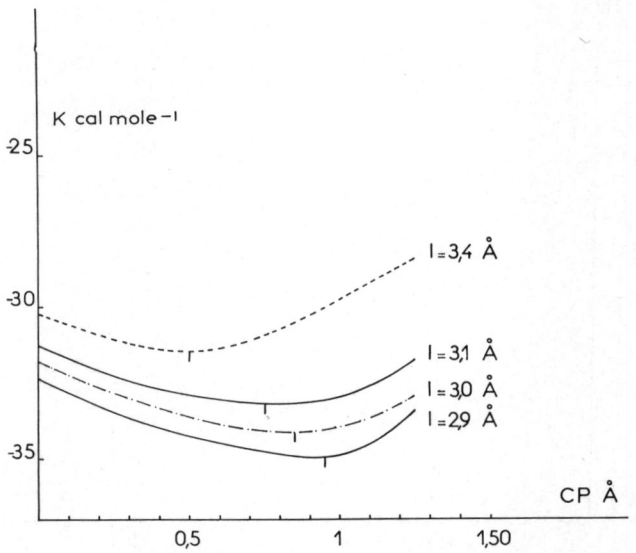


FIG. 13. — *Énergie potentielle de* Na^+ *pour différentes valeurs de l*

$l = (d001 - 6{,}6)$ Å. 6,6 Å étant la distance entre les deux plans passant par les centres des atomes d'oxygène de la surface. Pour la montmorillonite saturée par Na^+, $d001 = 9{,}6$ Å, $l = 3$ Å.

La figure 11 montre que la meilleure valeur de β est 93° 30′. Le graphique 12 indique que la charge portée par OH doit être — 1 et il ne peut pas en être autrement, car si on prend une valeur inférieure, la valeur de WFI est plus petite et la cote du minimum se trouve décalée vers les grandes valeurs. Ce décalage ne peut pas être compensé par d'autres valeurs de β. Il peut se faire évidemment que la charge de OH soit légèrement inférieure à 1, car dans les calculs nous avons pris des pas de variation assez grands (voir annexe II).

L'influence de la valeur de l sur l'énergie WCA est illustrée par la figure 13 dans le cas où $q_{OH} = -1$ et $\beta = 93° 30'$. Il apparaît ainsi que l a certainement une valeur comprise entre 2,9 et 3,1 Å, ce qui correspond à $9{,}5 \text{ Å} \leqslant d001 \leqslant 9{,}7$ Å. Il y a donc une interdépendance très étroite entre la valeur de la cote du sodium (CP = 0,85 Å) et la valeur de l'espacement interfeuillets ($d001 = 9{,}6$ Å).

b) *Argile saturée par les autres cations monovalents.*

La figure 14 donne les courbes WCA $= f(CP)$ pour les cations K^+, Rb^+ et Cs^+ avec les paramètres : charge de OH = — 1 ; $\beta = 93° 30'$; $l = 3{,}6$ Å (K^+), 4 Å (Rb^+), 4,6 Å (Cs^+). (Les valeurs de l correspondent aux valeurs de $d001$ données dans le tableau 2.)

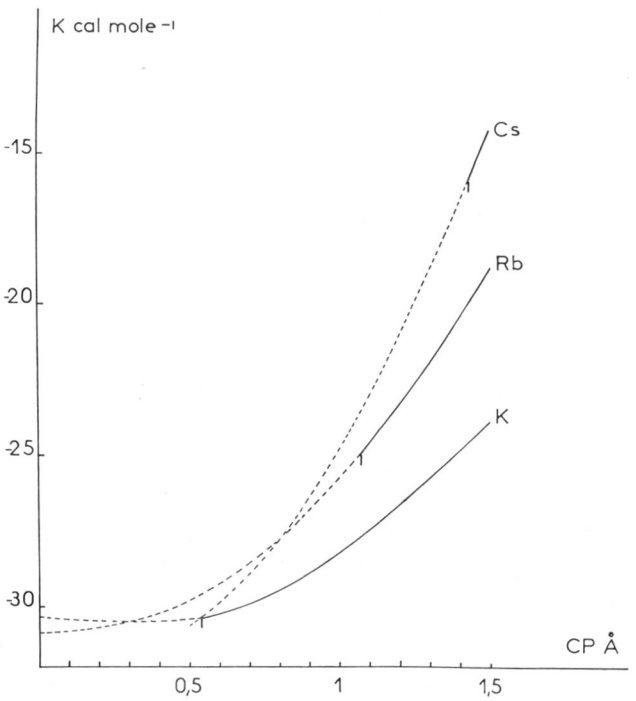


FIG. 14. — *Énergie potentielle des cations K^+, Rb^+ et Cs^+*

Pour chaque cation monovalent, les caractéristiques du minimum d'énergie potentielle sont données dans le tableau 6.

La répulsion entre les atomes d'oxygène de la surface et les cations n'a pas été évaluée, car nous nous sommes placé dans le cadre de l'approximation des sphères rigides. Il en résulte que pour K^+, Rb^+ et Cs^+, le minimum de la fonction WCA correspond à la cote pour laquelle ces cations sont tangents aux atomes d'oxygène (pour les cotes plus petites la répulsion est infiniment grande).

TABLEAU 6

Valeurs des différents termes énergétiques relatifs aux cations compensateurs

	CP Å	WFI (kcal mole^{-1})	WFS (kcal mole^{-1})	$\overline{Wrep}$ (kcal mole^{-1})	WCA (kcal mole^{-1})	E_c (kcal mole^{-1})
Li^+	0,85	— 128,4	— 51,3	+ 145,5	— 34,2	— 42
Na^+	0,85	— 128,4	— 51,3	+ 145,5	— 34,2	— 42
K^+	0,533	— 127,2	— 34,6	+ 131,4	— 30,4	— 14,5
Rb^+	1,069	— 127,8	— 36,6	+ 139,3	— 25,1	— 15,1
Cs^+	1,433	— 124	— 33	+ 141,2	— 15,8	— 7,2

Ces valeurs ont été obtenues en négligeant la polarisation des cations et la charge du feuillet FS. Le perfectionnement du calcul ne modifie pas essentiellement les résultats. La cote du sodium pour la position d'équilibre passe à 0,80 Å quand la polarisation du cation est introduite, et à 0,90 Å quand on ajoute la contribution de la charge du feuillet FS. Les cotes des autres cations restent inchangées ainsi que les classements des énergies.

C. — Forces de cohésion interfeuillets

Quand deux feuillets sont voisins, les réseaux sont à l'origine de trois types de forces :

— forces électrostatiques : dues aux charges provenant des substitutions isomorphiques et aux multipôles constitués par les électrons libres des atomes d'oxygène de la surface;

— forces de répulsion;

— forces de dispersion (Ottewill, 1966) : leur expression fait intervenir une constante (constante de Hamaker) dont très peu de valeurs sont connues. Des mesures très fines sur des micas ont conduit à la valeur de 10^{-12} erg/cm^2 (Tabor et Winterton, 1968). Il n'est pourtant pas possible d'utiliser cette valeur pour les argiles. Il faudrait, en effet, définir une valeur pour chaque configuration i (voir précédemment) et pour chaque espèce de cation. S'il en était ainsi, le problème de

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL - CENTRE DE GRIGNON

serait pas résolu pour autant, car il faudrait définir les lois d'additivité des forces dues à des configurations locales, ce qui est certainement très problématique eu égard aux difficultés soulevées par des molécules simples (SALEM, 1966). Ce sont ces forces qui assurent, avec les forces multipolaires, la cohésion des feuillets de minéraux non chargés comme la pyrophyllite et le talc.

Les forces qui déterminent l'espacement entre deux feuillets, et la facilité avec laquelle ils seront écartés lors d'un processus de solvatation sont :

— Les forces qui existent entre deux réseaux. Nous venons de les examiner et la seule indication qu'il est possible d'avancer à leur sujet, concerne l'écartement entre les feuillets voisins. Plus il sera grand, plus les forces de dispersion seront faibles.

— Les forces dues aux cations. Pour essayer de les décrire, considérons le système suivant (fig. 15), dans lequel les différents termes énergétiques sont :

- Attraction du feuillet FS par le cation 2 : W_2
- Attraction du feuillet FI par le cation 1 : W_1
- Répulsion moyenne entre les deux cations : W_r.

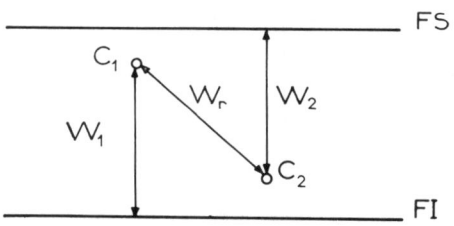


FIG. 15. — *Modèle utilisé pour déterminer la contribution des cations compensateurs à l'énergie de cohésion des feuillets*

Les deux premiers termes sont donnés par l'énergie d'un cation dans le champ électrique d'une cavité T. Le troisième terme est la répulsion moyenne entre un cation sur FI et un cation sur FS. Nous avons précédemment calculé $\overline{Wrep}$, pour 1 cation sur FI et 2,4 cations sur FS. Donc $W_r = \dfrac{\overline{Wrep}}{2{,}4}$

La somme $E_c = W_1 + W_2 + W_r$, représente la participation des cations à la cohésion. Il ne s'agit évidemment pas de l'énergie totale de cohésion.

D. — CONCLUSION DU PARAGRAPHE II

La valeur calculée de la cote CP correspondant à la position d'équilibre est donc comprise, pour Na^+, entre 0,80 et 0,90 Å. L'accord avec la valeur expérimentale 0,85 Å est convenable. Il faut observer que si nous négligeons l'effet des paires d'électrons libres, la valeur de CP devient zéro. Le rôle des électrons libres des atomes d'oxygène de la surface est donc très important.

Dans le cadre des modèles étudiés, nous avons déterminé une fonction d'énergie

potentielle totale dont le minimum correspond à une cote du cation voisine de la cote observée. Cette fonction est caractérisée par les valeurs des paramètres de OH données dans l'annexe II. La description du groupe OH conduit aux observations suivantes :

— $q_{OH} = -1$. Compte tenu de ce que nous avons dit précédemment, la valeur exacte n'est peut-être pas — 1, mais elle en est certainement voisine. Cela traduit donc l'existence de liaisons essentiellement ioniques entre les cations octaédriques et les atomes d'oxygène.

— La liaison O—H est moins polaire que dans la molécule d'eau. Cette tendance apparaît également dans les résultats obtenus par GRAHN (1964) qui montrent que la probabilité de la forme mésomère OH^- de l'ion $(OH)^-$ est assez élevée. Il en résulte que la charge positive portée par l'hydrogène est moins grande que dans H_2O. Cette propriété est compatible avec la facilité de migration des cations Li^+ dans les sites octaédriques libres lors du traitement thermique de la montmorillonite lithique (HOFFMANN et KLEMEN, 1950 ; GLAESER et MERING, 1967 ; PROST et CALVET, 1969 ; CALVET et PROST, 1971).

— L'angle $\theta = 114°$ (fig. 9) ; la direction OH fait donc avec le plan (*a*, *b*) un angle de 24°. De plus nous avons trouvé une valeur de 4° en l'absence de substitution isomorphique. Ces angles sont tout à fait en accord avec l'absence de propriétés dichroïques des vibrateurs OH dans le domaine infrarouge (FARMER et RUSSELL, 1964 ; AHLRICHS *et al.*, 1966).

La fonction potentielle totale correspond à une valeur de l'angle β de 93°30′. Dans ces conditions, la direction des paires d'électrons libres des atomes d'oxygène de la surface fait un angle de 46° 45′ avec cette surface. Cette valeur est plus grande que celle proposée par EMMERSON (1957) (35° 15′) qui admet l'existence d'hybridation tétraédrique. La valeur de β que nous proposons correspond à un caractère p beaucoup plus marqué. L'angle de 46° 45′ est aussi l'angle fait par un groupe OH lié par liaison hydrogène à l'atome d'oxygène de la surface. Il en résulte que des alcools à chaîne carbonée liés par liaison hydrogène ont une position telle que la chaîne carbonée fait un angle de 78° 30′ avec la surface. Cette valeur doit être comparée à la valeur de 77° proposée par BRINDLEY et RAY (1964) pour expliquer les valeurs des espacements d_{001} obtenus avec des alcools.

En résumé, les résultats essentiels sont les suivants :

— La charge du groupe OH est voisine de — 1 et l'état d'hybridation des orbitales qui décrivent les paires d'électrons libres des atomes d'oxygène de la surface est caractérisé par un angle $\beta = 93° 30'$.

— Dans l'état anhydre, les positions d'équilibre des cations K^+, Rb^+ et Cs^+ sont fixées par des contraintes stériques (les cations sont tangents aux atomes d'oxygène du réseau). Le lithium et le sodium ne peuvent pas être distingués et leurs positions sont entièrement déterminées par les attractions dues aux feuillets FI et FS.

— Les énergies des cations monovalents correspondant à la position d'équilibre se classent dans l'ordre : $Li^+ = Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$.

— La participation des cations à la cohésion se classe suivant l'ordre décroissant : $Li^+ = Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$.

— Compte tenu des forces de dispersion, la cohésion totale doit obéir au classement suivant : $Li^+ = Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$.

III. — ÉTUDE DES ÉTATS HYDRATÉS

La description des états hydratés nécessite la connaissance de la distribution des molécules d'eau par rapport aux cations et de leur énergie. Il faut donc décrire les interactions entre ces molécules d'une part, et le réseau et les cations compensateurs d'autre part. En outre, l'hydratation entraîne des modifications de l'énergie potentielle des cations. Il est important de les connaître car elles conditionnent les caractéristiques énergétiques des mouvements ioniques.

A. — Interactions relatives aux molécules d'eau

1. — *Description sommaire de la molécule d'eau* (fig. 16)

La molécule d'eau a fait l'objet de très nombreux travaux et une revue détaillée a été donnée par Eisenberg et Kauzmann (1969). Les descriptions proposées sont de deux types. Les unes sont basées sur des orbitales moléculaires (Pople, 1950 ; Ellison et Schull, 1955 ; Bishop et Randic, 1966 ; Horsley et Fink, 1969), les autres reposent sur la définition de modèles de charges ponctuelles (Bernal et Fowler, 1933 ; Verwey, 1942 ; Pople, 1951).

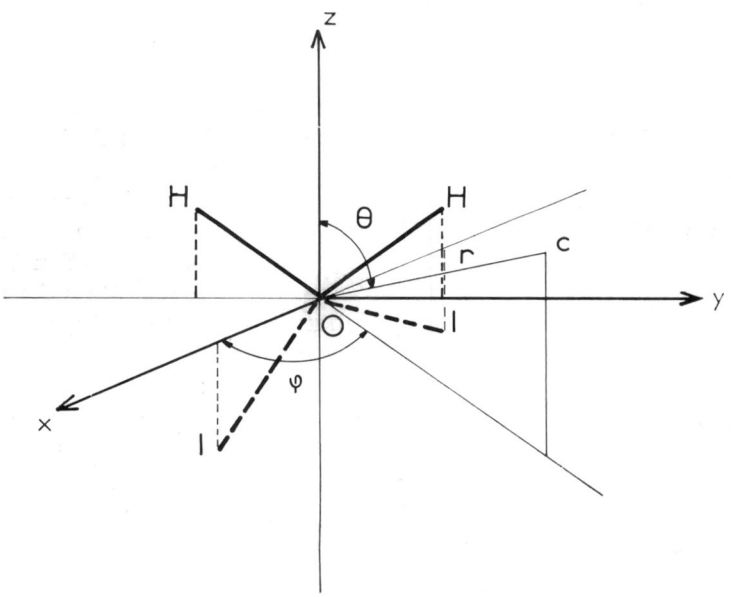


Fig. 16. — *Description de la molécule d'eau*

Une image commode est donnée par l'utilisation des orbitales moléculaires équivalentes (Duncan et Pople, 1953 ; Bader et Jones, 1963). Les électrons sont essentiellement localisés dans quatre régions de l'espace autour de l'atome d'oxygène : les deux liaisons OH, et les deux paires d'électrons libres. L'état d'hybridation des orbitales atomiques n'est pas tout à fait tétraédrique (sp^3). La direction OH n'est pas un axe de symétrie pour la distribution des électrons de liaison (Duncan et Pople, 1953 ; Bader et Jones, 1963) et cela a pour conséquence l'existence

d'un moment dipolaire perpendiculaire à OH (BURNELLE et COULSON, 1957). Enfin, les électrons des atomes d'hydrogène ne sont pas totalement localisés (BADER et JONES, 1963).

La distribution des charges d'une molécule se caractérise souvent par la définition de moments multipolaires. Le plus important est le moment dipolaire dont les termes sont (DUNCAN et POPLE, 1953) : paire libre : 3,03 D, liaison : — 6,82 D, proton : 5,63 D, total : 1,84 D (1) (le sens positif est celui de la direction OH projetée sur l'axe C_2 de la molécule). Il faut remarquer la contribution importante des paires d'électrons libres.

Les composantes du moment quadripolaire n'ont pas été déterminées expérimentalement, tout au moins d'une façon directe. La comparaison des chaleurs d'hydratation des ions F^- et K^+ fournit une valeur de $(\theta_a + \theta_b) = 3{,}9\ 10^{-26}$ u.e.s., $\theta_a = Q_{zz} - Q_{xx}$, $\theta_b = Q_{zz} - Q_{yy}$ (BUCKINGHAM, 1957). D'autres déterminations consistent à calculer les valeurs des composantes à partir de fonctions d'onde élaborées. Utilisant les fonctions d'ELLISON et SCHULL (1955) et de Mc WEENY et OHNO (1960), GLAESER et COULSON (1965) trouvent les valeurs suivantes :

$$\theta_{xx} = -6{,}56\ 10^{-26} \text{ u.e.s.}, \quad \theta_{yy} = -5{,}18\ 10^{-26} \text{ u.e.s.}, \quad \theta_{zz} = -5{,}73\ 10^{-26} \text{ u.e.s.}$$

Ces auteurs ont également déterminé les composantes du moment octupolaire :

$$R_{xzx} = R_{xxz} = R_{zxx} = -1{,}08\ 10^{-34} \text{ u.e.s.},$$
$$R_{yyz} = R_{yzy} = R_{zyy} = -0{,}50\ 10^{-34} \text{ u.e.s.},$$
$$R_{zzz} = -2{,}75\ 10^{-34} \text{ u.e.s.}$$

Toutes les composantes du moment quadripolaire sont négatives, ce qui traduit une contribution essentielle des électrons, par opposition au moment dipolaire qui est positif, ce qui indique une contribution essentielle des charges positives (GLAESER et COULSON, 1965).

La distribution des charges dans la molécule peut également être décrite par la détermination des charges portées par les atomes. L'analyse de populations (MULLIKEN, 1955 *a*, 1955 *b*) donne des estimations de ces charges :

atome d'oxygène : 0,35 u.a.
atome d'hydrogène : 0,175 u.a.

DELBÈNE et POPLE (1970) proposent 0,383 u.a. pour l'oxygène, 0,192 u.a. pour l'hydrogène.

Cependant, la seule connaissance de ces charges n'est pas suffisante pour décrire la molécule, car la présence des paires libres fait que la distribution des charges ne peut pas être représentée dans un plan.

Une autre constante physique fondamentale de la molécule est la polarisabilité α. La polarisabilité moyenne $\bar{\alpha}$ déduite de l'indice de réfraction extrapolé aux longueurs d'onde infinies est $1{,}444\ 10^{-24}$ cm^3 (in EISENBERG et KAUZMANN, 1969). Des mesures de la constante de Kerr effectuées sur l'eau liquide (MEYER, in EISENBERG et KAUZMANN, 1969) indiquent une faible anisotropie de la polarisabilité, de telle sorte que la valeur moyenne peut être utilisée.

2. — *Les différents types d'interactions*

(Les détails concernant les calculs des énergies relatives à ces interactions sont donnés dans l'annexe IV.)

a) *Interactions cation-eau.*

α) *Nature de la liaison cation-eau.*

L'étude de l'hydratation des ions a fait l'objet de nombreuses théories. Celles proposées par BERNAL et FOWLER (1933), ÈLEY et EVANS (1938) et VERWEY (1942) considèrent que les interactions entre le cation et les molécules d'eau qui l'entourent sont de nature purement électrostatique. Cependant, la présence de paires d'électrons libres peut laisser supposer la possibilité d'une liaison partiellement covalente. Des complexes formés par des cations monovalents et des molécules organiques ont été décrits : complexes formés par le tétrahydrofuranne, le diéthyloxyde, et la pyridine avec le sodium (SCHASCHEL et DAY, 1968), l'acétone avec le sodium et le lithium

(1) 1 D = 10^{-18} u.e.s.

(YAMADA, 1960 *a*, 1960 *b*), le dibenzoyle-méthanate et les cations alcalins. Pour ces derniers, la stabilité se classe dans l'ordre : $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$ (BASOLO et PEARSON, 1960).

Étant donné la différence d'énergie entre les niveaux s et p d'un cation alcalin, une liaison faisant intervenir l'orbitale p semble improbable. Comme seule l'orbitale s peut participer à la liaison, les complexes entre le lithium, le sodium et l'acétone ont été décrits à l'aide d'un modèle de liaison « tournante » (YAMADA, 1960 *a*, 1960 *b*) :

L'étude spectroscopique (infrarouge et ultraviolet) a permis d'évaluer le caractère covalent de cette liaison :

O—Li^+	13 p. 100
O—Na^+	8 p. 100

L'application de la méthode C. N. D. O. à l'étude de l'hydratation des cations a montré qu'il pouvait y avoir un petit transfert de charge sur le cation (BURTON et DALY, 1970) : 0,11 u. a. pour Li^+, 0,06 u. a. pour Na^+.

Les mesures de résonance magnétique nucléaire effectuées sur des solutions aqueuses montrent que la contribution des effets non électrostatiques est négligeable pour les cations alcalins et conduisent à considérer la liaison cation-molécule d'eau comme une liaison essentiellement ionique (HINDMAN, 1962).

Comme le soulignent GONTCHAROV *et al.* (1967), la comparaison des potentiels d'ionisation des cations alcalins et de l'eau (12,56 eV) n'est évidemment pas favorable à la formation d'une liaison covalente. Dans un même ordre d'idée, les valeurs des électronégativités de l'oxygène et des cations monovalents font prévoir des liaisons ayant un caractère covalent de l'ordre de 20 p. 100 (PAULING, 1960).

Par conséquent, la liaison entre l'eau et les cations alcalins ne semble pas devoir présenter un caractère covalent marqué. Il nous a donc paru raisonnable de la décrire comme une liaison ionique.

β) *Expression de l'énergie d'interaction cation-eau.*

L'énergie d'interaction entre un cation et une molécule d'eau s'écrit :

$$W_h = W_p + W_m + W_{pol} + W_{dr}$$

où

W_p = énergie correspondante à la molécule d'eau non polarisée,
W_m = énergie correspondante aux moments induits dans la molécule d'eau,
W_{pol} = énergie de polarisation de la molécule d'eau,
W_{dr} = énergie de dispersion et de répulsion entre le cation et une molécule d'eau.

On a :

$$W_p = Z_c \text{ (charge du cation)} \times V \text{ (potentiel dû à } H_2O).$$

Le potentiel V peut être déterminé, soit sur la base d'un modèle de charges ponctuelles (BERNAL et FOWLER, 1933 ; VERWEY, 1942 ; POPLE, 1951), soit en tenant compte des moments multipolaires (BUCKINGHAM, 1957 ; VASLOW, 1963).

Dans ce dernier cas, l'évaluation serait plus exacte (EISENBERG et KAUZMANN, 1969) car les modèles de charges ponctuelles constituent une simplification trop grande de la vraie distribution de charge, conduisant à des valeurs erronées des moments d'ordre élevé. En conséquence, nous avons utilisé un modèle proposé par COULSON et EISENBERG (1966) : la distribution des charges est représentée par un dipôle ponctuel, un quadripôle ponctuel et un octupôle ponctuel, tous situés sur le noyau de l'atome d'oxygène.

Les termes W_m et W_{pol} sont calculés en considérant la molécule d'eau comme une sphère isotrope et polarisable de polarisabilité moyenne $\alpha = 1{,}444 \cdot 10^{-24}$ cm^3. Les évaluations numériques montrent, en particulier que la polarisation par le cation est plus importante que celle due au réseau. Par exemple : pour une molécule d'eau tangente à un cation Na^+ situé à la cote CP = 0,95 Å, on a :

moment induit par le cation : $\mu_c = 1{,}28 \cdot 10^{-18}$ u. e. s.
moment induit par le réseau : $\mu_R = 0{,}35 \cdot 10^{-18}$ u. e. s.

L'énergie de dispersion est évaluée à l'aide de la formule de LONDON (BUCKINGHAM, 1967 ; SALEM, 1965). Elle est faible : 0,1 kcal mole^{-2} pour Li^+, 0,5 kcal mole^{-1} pour Cs^+. Enfin, l'énergie de répulsion est décrite à l'aide du modèle des sphères rigides (BUCKINGHAM, 1957) dont nous donnons une justification dans l'annexe IV.

b) *Interactions entre les molécules d'eau.*

Elles sont de trois types :

— Les interactions électrostatiques : elles sont dues aux propriétés polaires des molécules d'eau. Nous les avons évaluées en ne tenant compte que des moments dipolaires permanents et induits à l'aide d'un modèle de trois molécules d'eau situées symétriquement autour d'un cation.

— Les interactions de répulsion et de dispersion : leur évaluation repose sur la formule donnée par MARGENAU et MYERS (1944). Les énergies correspondantes sont faibles (valeurs maximum : répulsion : + 0,58 kcal mole^{-1} ; dispersion : — 0,8 kcal mole^{-1}) et nous les avons négligées.

— Les interactions par liaisons hydrogène. Elles sont essentiellement à l'origine des associations intermoléculaires des molécules d'eau. La distance qui sépare deux molécules ainsi liées est de 2,73 Å et l'énergie de liaison correspondante est 6,03 kcal mole^{-1} (DELBENE et POPLE, 1970). Cette liaison entraîne une modification de la distribution des charges dans la molécule, telle que la charge positive de l'hydrogène et la charge négative de l'oxygène sont augmentées. Il en résulte que les liaisons hydrogène peuvent être décrites comme un phénomène coopératif (FRANK, 1958 ; DELBENE et POPLE, 1970).

Dans l'eau, HAGIS *et al.* (in HINDMAN, 1962) estiment qu'il y a 1,82 liaison hydrogène par molécules à 0°C. Ceci correspond à une énergie d'interaction de 10,9 kcal mole^{-1}. Cette valeur peut servir de base pour estimer l'énergie des molécules d'eau liées de cette façon dans l'espace interlamellaire de l'argile hydratée.

c) *Interactions entre les molécules d'eau et le réseau.*

Des études récentes ont montré que l'adsorption de l'eau sur la montmorillonite modifiait les valeurs des paramètres *a* et *b* de la maille (LOW *et al.*, 1970 ; EIRISH et TRET'YAKOVA, 1970). Cependant, nous ne pouvons pas tenir compte de ce fait

car nous avons utilisé des modèles trop simplifiés pour pouvoir décrire, en les utilisant, des changements relativement faibles. Nous envisagerons donc les interactions eau-réseau, en supposant que ce dernier conserve des propriétés constantes au cours de l'hydratation de l'argile.

Deux types d'interactions sont possibles : les unes sont purement électrostatiques, les autres font intervenir des liaisons hydrogène avec les atomes d'oxygène de la surface.

Les interactions électrostatiques concernent l'énergie des dipôles permanents et induits et du quadripôle de la molécule d'eau dans le champ électrique du réseau. Celui-ci est dû essentiellement aux atomes d'oxygène de la surface (cavités H et T), le rôle des charges résultant des substitutions isomorphiques étant peu important du fait de leur éloignement et de l'effet d'écran dû aux cations compensateurs et aux atomes du réseau. Les calculs montrent que ces interactions déterminent en grande partie l'orientation par rapport au feuillet, des molécules d'eau voisines des cations.

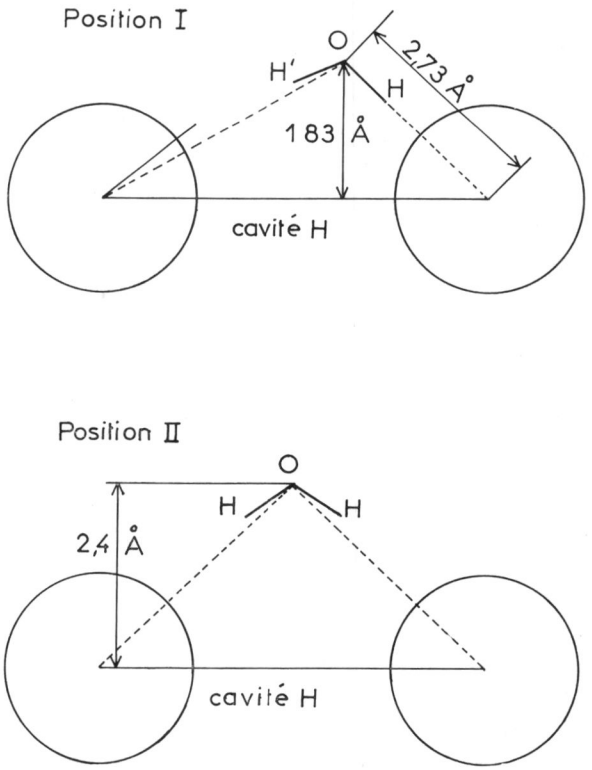


FIG. 17. — *Liaisons hydrogène entre la molécule d'eau et les atomes d'oxygène de la surface*

Les orbitales des paires d'électrons libres des atomes d'oxygène font un angle de 45° 46′ avec la surface. Cette orientation peut permettre l'établissement de liaisons hydrogène si la molécule d'eau se trouve dans une cavité hexagonale. De plus, l'excès d'électrons de ces atomes par rapport à l'oxygène de l'eau, et le caractère p marqué des orbitales libres, sont des facteurs favorables (MURREL, 1969).

La figure 17 indique les deux positions et orientations les plus favorables pour lesquelles les énergies sont les suivantes :

Position I — orientation HOH', cote 1,85 Å WLR = — 8,8 kcal mole^{-1}($m_{I_{l_2}}$)
Position II — orientation HOH, cote 2,40 Å WLR = — 5,8 kcal mole^{-1}($m_{II_{l_2}}$)

Dans le calcul de ces valeurs nous avons également tenu compte de l'énergie des dipôles dans le champ électrique des atomes d'oxygène de la cavité hexagonale (les renseignements nécessaires à la détermination des énergies des liaisons hydrogène sont données par DELBÈNE et POPLE (1970)).

B. — LES ÉTATS D'HYDRATATION DE L'ARGILE

C'est la variation de l'espacement apparent *d*001 en fonction de la teneur en eau qui nous a permis de définir les états 1 et 2. Ils correspondent à un écartement entre les feuillets qui fixe à la fois le volume de l'espace interlamellaire et la valeur du champ électrique dû au réseau. Les molécules d'eau adsorbées sur la surface interne se trouvent donc dans des conditions stériques et énergétiques données pour chacun des états 1 et 2. Il faut bien noter que ces états ne correspondent pas à une teneur en eau déterminée. Ainsi peut-on déjà observer l'état 1, alors que tout l'espace interlamellaire n'est pas rempli de molécules d'eau.

Dans le paragraphe précédent, nous avons décrit les méthodes de calculs des différentes énergies d'interaction. Ces renseignements joints aux caractéristiques de la distribution des cations données au cours de l'étude de l'état anhydre permettent d'aborder la description des états hydratés.

1. — *Premier état d'hydratation. État* 1

Il est important de distinguer les molécules d'eau voisines des cations compensateurs de celles qui en sont éloignées. Ces deux grandes catégories sont en fait constituées par plusieurs populations qui dépendent pour la première, en particulier, de la distribution des cations.

a) *Distribution des molécules d'eau voisines des cations.*

Quand les cations situés sur la surface FI n'ont pas de voisins situés sur la surface FS, les molécules peuvent occuper trois positions (fig. 18). Selon qu'elles se trouvent près de 1, 2 ou 3 cations, nous les noterons m_{I_a}, m_{II_a}, m_{III_a}. Dans le cas contraire, d'autres catégories de molécules apparaissent.

Considérons un cation isolé sur la surface FI. Sur la surface FS, se trouvent trois cavités hexagonales voisines. Supposons que l'une d'elles soit occupée par un cation. Les molécules d'eau peuvent alors se répartir de deux façons.

1° *Mode de répartition* TD (fig. 19) : le cation sur la surface FI peut conserver son entourage de trois molécules d'eau ou ne pas le conserver (c'est alors le cation sur la surface FS qui le conserve). Dans le premier cas, le cation sur FI a trois molécules voisines et le cation sur FS n'en a que deux : nous appellerons ce mode TDI (fig. 19 *a*). Dans le deuxième cas, c'est l'inverse, nous l'appellerons mode TDS (fig. 19 *b*).

Étant donné que ces deux modes TDI et TDS sont également probables, nous affecterons une probabilité 0,5 à chacun. Pour l'ensemble de deux cations, l'un sur FI, l'autre sur FS, ces deux modes sont évidemment identiques. Comme nous ne décrivons que l'entourage d'un cation sur la surface FI, il faut tenir compte de ces deux arrangements.

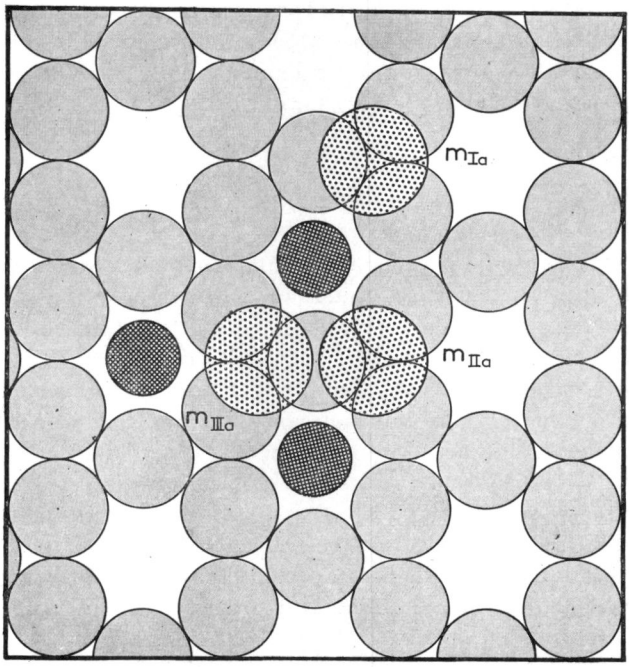


FIG. 18. — *Différentes catégories de molécules d'eau*
Les cations situés sur la surface FI n'ont pas de cations voisins situés sur la surface FS

cations compensateurs

molécules d'eau

atomes d'oxygène de la surface

Ce mode TD fait apparaître une nouvelle catégorie de molécules d'eau : celles qui sont situées près de deux cations, l'un sur la surface FI, l'autre sur la surface FS. Nous les noterons m_{IIb}. Leur interaction avec le cation sur FI est différente selon les modes TDS et TDI, aussi distinguerons-nous :
molécules dans le mode TDS : m_{IIb_s} ; molécules dans le mode TDI : m_{IIb_i}.

Compte tenu des probabilités des différentes configurations des cations, le nombre moyen, par cation, de chaque catégorie de molécules peut être calculé (annexe V). En admettant qu'autour d'un cation isolé il peut y avoir au plus trois molécules d'eau, on obtient :

$$1{,}553\ m_{Ia}\ ; \qquad 0{,}420\ m_{IIb}\ ; \qquad 0{,}369\ m_{IIb_s}\ ; \qquad 0{,}324\ m_{IIb_i}.$$

Soit un nombre moyen total de 2,67 molécules par cation.

2° *Mode de répartition* TA (fig. 19 *c*) : une autre catégorie de molécules apparaît :

les molécules situées entre un cation sur FI et un cation sur FS, dans le plan passant par les deux cations. Nous les désignerons par m_{I_b}.

Le nombre moyen de molécules d'eau par cation est 2,52 pour Li^+ et Na^+, 2,14 pour K^+, Rb^+ et Cs^+. Cette différence provient du fait que l'espace disponible pour les molécules du type m_{I_b} est insuffisant avec les gros cations. La répartition est la suivante :

Li^+, Na^+ : 1,684 m_{I_a} ; 0,457 m_{II_a} ; 0,381 m_{I_b}.

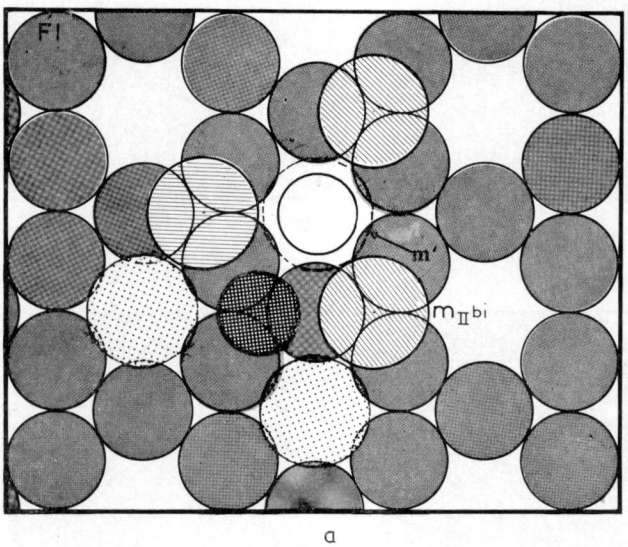
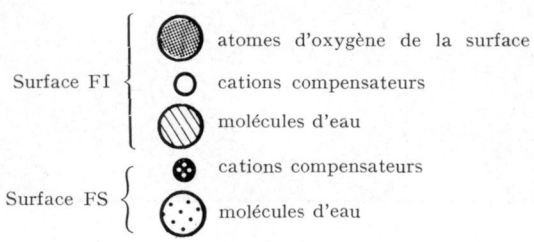


FIG. 19. — *Différentes catégories de molécules d'eau*
Le cation situé sur la surface FI a un cation voisin situé sur la surface FS

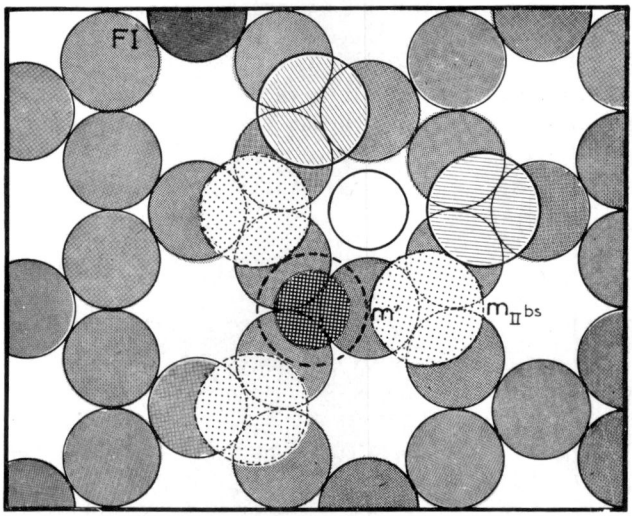


b) *Caractéristiques énergétiques des différentes catégories de molécules d'eau.*

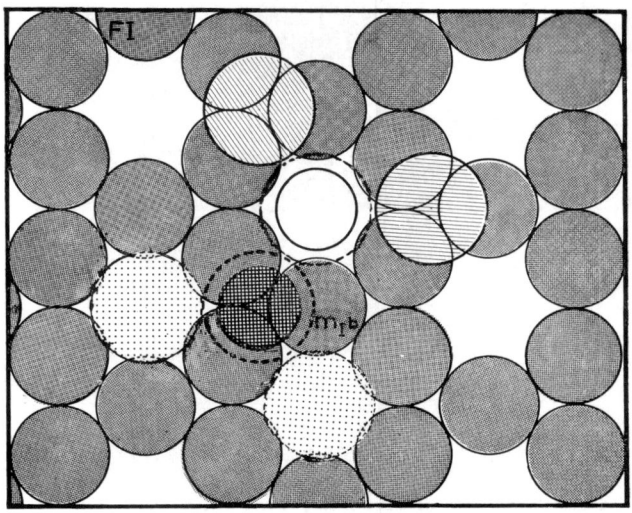
α) *Molécules voisines des cations.*

(Le détail des calculs et leur discussion sont exposés dans l'annexe IV).

Le tableau 7 donne l'énergie des différentes catégories de molécules d'eau précédemment définies. Nous constatons que le classement des énergies relatives aux molécules m_{I_a} et m_{II_a} est le même que celui des chaleurs d'hydratation (BERNAL et FOWLER, 1933 ; ELEY et EVANS, 1938 ; BUCKINGHAM, 1957). Ceci est dû au fait que ces molécules sont dans des positions voisines de celles qu'elles occupent dans des solutions.

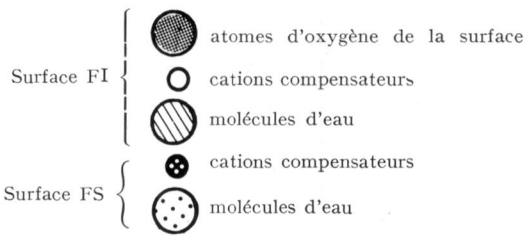


b



c

FIG. 19. — *Différentes catégories de molécules d'eau*
Le cation situé sur la surface FI a un cation voisin situé sur la surface FS
— *b* : mode de répartition TDS
— *c* : mode de répartition TA



L'étude des variations de l'énergie de la molécule d'eau située près d'un cation isolé en fonction de sa position et de son orientation, montre que l'état le plus stable est tel que la molécule est tangente au cation et que son axe C_2 est aligné ou presque avec la direction cation-oxygène (de H_2O). Cette position et cette orientation sont modifiées par la présence d'autres cations comme l'indiquent les caractéristiques des molécules m_{II_a}, m_{I_b} et m_{II_b}. *A priori*, il est possible de concevoir que d'autres molécules d'eau puissent également intervenir par l'établissement de liaisons hydrogène. Ce serait le cas, en particulier, d'une configuration où les molécules voisines des cations auraient une position et une orientation semblables à celles qu'ont les molécules dans la glace. L'étude des énergies correspondantes montre que cette situation n'est pas possible, car elle ne constitue pas l'état le plus stable (sauf peut-être pour Cs^+), et surtout parce qu'elle impose une indépendance entre les propriétés des molécules adsorbées et la nature des cations compensateurs, ce qui est en désaccord avec les résultats expérimentaux.

TABLEAU 7

Energies des différents types de molécules d'eau

	m_{I_a}	m_{II_a} (1)	m_{I_b} (2)	$m_{II_{bs}}$	$m_{II_{bi}}$
Li^+	— 31,1	— 15,5	— 15,1	— 1,1	— 32,0
Na^+	— 25,9	— 13,1	— 10,2	— 0,1	— 26,1
K^+	— 19,1	— 10,0		— 0,9	— 20,3
Rb^+	— 16,8	— 9,0		— 4,8	— 15,1
Cs^+	— 14,6	— 8,2		— 9,6	— 15,1

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

(1) Une molécule m_{IIa} est entre deux cations sur la surface FI, C_1 et C_2. Quand ils sont identiques, la molécule a la même probabilité d'être près de C_1 que de C_2. La valeur indiquée est donc la moyenne correspondant aux deux configurations.

(2) Les valeurs données sont aussi les moyennes de deux configurations : H_2O près du cation sur la surface FI, H_2O près du cation sur la surface FS.

β) *Molécules éloignées des cations.*

Les interactions avec le réseau peuvent être de nature multipolaire ou être dues à des liaisons hydrogène. Ces dernières ne s'établissent que si la molécule se place à l'aplomb d'une cavité hexagonale où elle peut occuper deux positions qui caractérisent les types $m_{I_{l_2}}$ et $m_{II_{l_2}}$ définis précédemment. Il leur correspond des énergies de 8,8 et 5,8 kcal $mole^{-1}$ (WLR). La proximité des deux surfaces limitant l'espace interlamellaire interdit la présence de molécules voisines liées au réseau par liaisons hydrogène (cette situation donne lieu à des états répulsifs). Ces catégories de molécules ne peuvent donc exister qu'isolément. Ceci, joint au fait qu'elles doivent occuper des positions déterminées, montre que leur nombre est certainement très limité. Il est cependant possible que ce nombre soit plus grand sur les surfaces externes où il n'y a pas de compétition entre les réseaux.

Dans l'espace interlamellaire, les relations entre les molécules d'eau éloignées

des cations sont au moins qualitativement du même type que dans l'eau liquide. Par analogie, il est donc possible de décrire les interactions intermoléculaires, soit sur la base de la formation et de la disparition continue des liaisons hydrogène (BERNAL et FOWLER, 1933 ; HAGGIS *et al.*, 1952 ; PAULING, 1960), soit sur la base de liaisons hydrogène déformées (LENNARD-JONES et POPLE, 1951).

Plusieurs catégories de molécules peuvent être définies en fonction du nombre de liaisons hydrogène qu'elles contractent (0, 1, 2, 3, 4). Différents travaux ont eu pour but d'estimer la probabilité de chaque catégorie (NEMETHY et SCHERAGA, 1962 ; BUIJS et CHOPPIN, 1963), ou la proportion de liaisons hydrogène rompues. A 25°C, cette proportion est d'environ 10 p. 100 du nombre maximum qui est de deux liaisons hydrogène par molécule (HAGGIS *et al.*, 1952). Autrement dit, dans l'eau liquide, il y aurait en moyenne 1,8 liaisons hydrogène par molécule. Du fait des contraintes stériques dans l'espace interlamellaire, une molécule ne peut contracter que trois liaisons hydrogène au maximum. L'énergie moyenne d'interaction d'une molécule éloignée des cations a donc pour valeur limite supérieure l'énergie correspondant à 1,8 liaison hydrogène, soit 10,8 kcal mole^{-1} (WLE). La proximité des deux réseaux ne constitue pas un obstacle et il en résulte que de nombreuses molécules peuvent ainsi être liées, de telle sorte que leur tendance à posséder un entourage tétraédrique soit satisfait le mieux possible, compte tenu de l'espace disponible. En utilisant ce principe, MAMY (1968) a proposé un arrangement des molécules sur la surface. Enfin, il faut noter que le caractère coopératif des liaisons hydrogène doit jouer un rôle important (FRANK, 1958 ; LOW, 1961), en particulier dans la formation de polymères cycliques (DELBÈNE et POPLE, 1970).

La situation des molécules voisines de celles qui sont liées aux cations est difficile à décrire, car il doit y avoir une compétition entre les champs électriques des cations et des molécules d'eau, comme cela a été suggéré pour les solutions aqueuses d'électrolytes (GURNEY, 1953 ; FRANK et WEN-YANG-WEN, 1957 ; SPARNAY, 1966).

2. — *Deuxième état d'hydratation. État 2*

La description de cet état est difficile, car nous ne disposons pas de données précises mises à part les valeurs des espacements *d*001. Nous avons donc choisi d'examiner deux cas extrêmes :

1° L'état 2 est formé par un simple remplissage de l'espace interlamellaire, les cations restant à la même place que dans l'état 1.

2° Dans l'état 2, les cations ont un entourage de molécules d'eau le plus proche possible de celui qu'ils ont en solution.

a) *Première description de l'état 2.*

Les molécules d'eau qui viennent s'ajouter près des cations sont de deux catégories :

— Celles qui n'avaient pas de place dans l'état 1 : molécules *m'* (fig. 19).

— Celles qui viennent se placer au-dessus des trois molécules d'eau qui entourent le cation : molécules *ms*.

Les premières sont du type *a* (m_{I_a}, m_{II_a}), et nous connaissons les valeurs de leur énergie d'interaction avec les cations. Les deuxièmes, quand il n'y a pas de cation

voisin sur FS, sont appelées ms_0. Quand il y a un cation sur FS, la molécule est appelée ms_1 et elle ne peut exister que dans le mode de superposition TD. Les énergies correspondantes sont calculées avec les mêmes approximations que pour les molécules m_{II_a}. La distribution des différentes catégories de molécules est obtenue comme précédemment. On a :

$$1{,}954\ m_{I_a}\ ; \qquad 0{,}523\ m_{II_a}\ ; \qquad 0{,}756\ m_s\ (0{,}513\ m_{so} + 0{,}243\ m_{sl}).$$

b) *Deuxième description de l'état 2.*

Compte tenu de l'espace disponible quand les feuillets sont écartés, les cations doivent se trouver dans une situation voisine de celle qu'ils occupent en solution. Cependant, un espacement apparent de 15,5 Å ne permet pas l'existence de plusieurs sphères d'hydratation. Il nous faut donc tenir compte des molécules d'eau immédiatement voisines du cation. Plusieurs travaux ont conduit à l'évaluation du nombre de ces molécules dans les solutions aqueuses d'électrolytes.

La chaleur d'hydratation calculée correspond à la chaleur d'hydratation mesurée pour un nombre de molécules d'eau voisines du cation, variable selon le type de calcul. Les nombres correspondants sont donnés dans le tableau 8.

TABLEAU 8

Nombre de molécules d'eau immédiatement voisines d'un cation

Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	Auteurs
4	4	4	4	4	Buckingham, 1957
—	6	6	6	6	Moelwyn-Hugues, 1948
4	—	6-8	6-8	6-8	Verwey, 1942 (1)
4	4	—	—	—	Mikaulin, 1959
4-6	4-6	—	—	—	Burton, Daly, 1970 (2)

(1) Verwey a effectué ses calculs pour des cations de rayon 1,36 Å et 2 Å.

(2) La méthode C. N. D. O. appliquée à l'hydratation des cations ne permet pas de choisir entre les nombres 4 et 6.

Les mesures de distributions radiales effectuées sur des solutions permettent d'obtenir une moyenne du nombre de molécules d'eau situées près du cation (tabl. 9).

TABLEAU 9

Résultats des mesures de distributions radiales

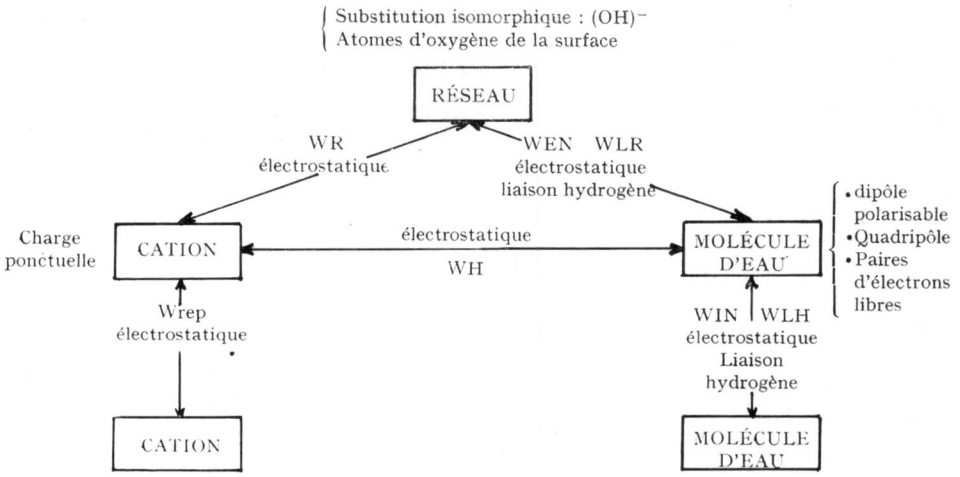
Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+	Auteurs
4	—	4	—	—	Brady, 1958
4	3,1	2,1	1,6	1	Hindman, 1962

Compte tenu de ces renseignements, nous avons supposé qu'il y avait quatre molécules d'eau en moyenne autour d'un cation. Dans ces conditions, les cotes CP des cations sont modifiées puisqu'ils se trouvent maintenant au centre de tétraèdres réguliers placés de telle sorte qu'une de leur face soit parallèle à la surface du feuillet. Le calcul de l'énergie d'interaction eau-cation est fait comme pour les molécules m_{1a}.

Pour les molécules éloignées des cations, les types d'interactions sont certainement les mêmes que dans l'état 1. Toutefois les liaisons hydrogène intermoléculaires doivent être plus proches de ce qu'elles sont dans une solution aqueuse d'électrolyte étant donné qu'une molécule peut être entourée par quatre autres molécules d'eau.

C. — Conclusion du paragraphe III

L'évaluation des caractéristiques énergétiques relatives aux espaces interlamellaires d'une argile hydratée repose sur différentes énergies d'interactions qui peuvent être schématisées de la façon suivante :



Cette analyse permet de suggérer l'existence de plusieurs populations de molécules d'eau dont les états énergétiques sont différents et très étroitement dépendants de la nature des cations compensateurs. Ces données permettent de proposer des descriptions des états hydratés 1 et 2 et constituent une base pour l'interprétation des résultats expérimentaux.

IV. — DESCRIPTION DE L'HYDRATATION DE L'ARGILE

A. — Propriétés de l'eau adsorbée

L'objet de ce paragraphe n'est pas d'analyser la totalité des propriétés de l'eau adsorbée, mais seulement d'examiner celles qui sont directement liées à l'étude que nous venons d'effectuer.

1. — *Arrangements des molécules d'eau*

L'eau adsorbée sur l'argile ne peut pas être décrite par un schéma unique et il est plus exact de parler de structure ou d'ordre de façon statistique. L'examen des énergies d'interaction des molécules d'eau, avec les cations, le réseau ou d'autres molécules d'eau montre nettement l'existence de deux grandes classes de populations de molécules. L'une, caractérisée par des énergies généralement élevées (tabl. 7), est constituée par les molécules voisines des cations ; l'autre, caractérisée par des énergies souvent plus faibles (WLR et WLE), correspond aux molécules éloignées des cations. Les différences entre ces deux classes de populations sont importantes quand le cation compensateur est le lithium ; elles sont très réduites avec le césium. L'individualisation des molécules d'eau situées près des cations n'est pas en contradiction avec les résultats de spectrométrie d'absorption dans l'infrarouge (RUSSELL et FARMER, 1964 ; TARASEVICH et OVCHARENKO, 1966 ; PROST, 1971). Ces considérations rejoignent celles de travaux antérieurs relatifs à l'hydratation des argiles (HENDRICKS *et al.*, 1940 ; LOW, 1961 ; MERING, 1964). D'une façon générale, les molécules d'eau peuvent donc occuper de nombreux états différents et la probabilité de passage de l'un à l'autre est donnée par la statistique de Boltzman. Par exemple, soit deux états I et II d'énergies E_I et E_{II} (E_I et $E_{II} < 0$) ; la probabilité d'occupation de l'état I est :

$$P_I = [1 + \exp(-\Delta E/RT)]^{-1} \qquad \Delta E = E_{II} - E_I$$
$$E_{II} = E_I \longrightarrow P_I = 0{,}5$$
$$|E_{II}| \gg |E_I| \longrightarrow P_I \to 0$$
$$|E_{II}| \ll |E_I| \longrightarrow P_I \to 1.$$

Il est donc possible de prévoir que l'échange entre les molécules d'hydratation des cations et les autres molécules se fera avec une facilité croissante dans l'ordre : $Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+$.

Un tel échange existe également dans les solutions aqueuses d'électrolytes (AKITT et DOWNS, 1967 ; SAMOÏLOV et MALENKOV, 1967), mais il est très réduit quand les cations ont un fort pouvoir polarisant. C'est ainsi que les mouvements des molécules d'eau sont très limités en présence de cations Li^+ (LEUNG et SAFFORD, 1970). SHAINBERG (1966) a développé des considérations analogues pour décrire l'hydratation des cations compensateurs dans des argiles en suspension.

L'action compétitive du champ électrique cationique et du champ électrique des autres molécules et le nombre limité de liaisons hydrogène contractées avec le réseau, font que les molécules éloignées des cations peuvent occuper un grand nombre d'états énergétiquement très voisins (les énergies mises en jeu sont alors de 5 à 10 kcal $mole^{-1}$). Du fait de l'agitation thermique, ces molécules d'eau doivent changer d'état facilement et ne sont donc pas figées dans une position déterminée. Un certain nombre de résultats expérimentaux conduisent à cette conclusion. L'étude thermodynamique de l'eau adsorbée montre effectivement que les molécules sont mobiles quand le taux de recouvrement de la surface est supérieur à 0,3 (FRIPIAT *et al.*, 1965). Cette limite est due aux premières molécules dont la probabilité d'être en interaction avec les cations est grande. Le coefficient de diffusion de l'eau est plus grand dans une solution saline que dans l'eau pure (WANG, 1954) et, pour les argiles,

divers travaux montrent qu'il est élevé : de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} cm^2 sec^{-1} (KEMPER *et al.*, 1964 ; MOKADI et LOW, 1966 ; LOW, 1968).

Le temps pendant lequel une molécule appartient à une population donnée peut être assez long pour qu'il soit possible de parler de configurations locales, comme pour des molécules d'eau situées près d'un cation, ou près d'autres molécules par exemple. Dès lors, des mesures appropriées permettent de mettre en évidence différentes propriétés liées à ces configurations.

La diminution d'entropie de l'eau adsorbée par rapport à l'eau liquide est due à l'effet des cations (OSTER et LOW, 1963 ; VAN OLPHEN, 1965). Les spectres d'absorption infrarouge de l'argile hydratée montrent l'existence de propriétés dichroïques attribuables à l'eau (PROST et CHAUSSIDON, 1969). En effet, plusieurs états de la molécule d'eau précédemment décrits, sont en accord avec cette observation : molécules voisines des cations (voir en particulier le rôle du moment quadripolaire dans l'interaction avec le réseau), molécules liées à d'autres molécules par ponts hydrogène. Les rotations des molécules sont également perturbées par toutes les interactions qui viennent d'être décrites et cela permet d'expliquer l'augmentation du temps de relaxation de l'eau adsorbée et sa dépendance vis-à-vis de la nature des cations et de la teneur en eau (BERENDSEN, 1967 ; MAMY, 1968).

Dans l'espace interlamellaire, les molécules d'eau sont soumises à des champs électriques intenses et de diverses origines. Elles sont réparties en populations pour lesquelles il est possible de définir des arrangements localisés, et entre lesquelles des échanges s'effectuent d'une manière étroitement dépendante de la nature des cations compensateurs. Cette conception signifie que l'eau adsorbée ne peut pas être considérée comme un liquide à deux dimensions. Étudiant les raies de diffraction *hk* de montmorillonites hydratées, MERING et BRINDLEY (1967) sont arrivés à la même conclusion. Elle signifie également qu'il n'est pas possible de décrire une structure sur de grandes distances comme dans l'état solide.

2. — *Polarisation des molécules d'eau*

Cette polarisation est surtout due au champ électrique du cation. Elle se traduit par une augmentation de la charge positive de l'hydrogène et un affaiblissement de la liaison O—H qui ont plusieurs conséquences. Les molécules polarisées peuvent facilement établir des liaisons hydrogène, d'une façon d'autant plus marquée que le pouvoir polarisant des cations est grand (FARMER et RUSSELL, 1967). Toutefois, bien que cette polarisation soit un facteur favorable, la formation de liaisons hydrogène peut être impossible ou difficile par suite d'un empêchement stérique. C'est le cas, en particulier, des molécules d'eau situées près des cations dans l'état 1 (avec $d001 = 12{,}4$ Å). Leur orientation est telle en effet, que la formation de ces liaisons est certainement peu probable.

La polarisation est également à l'origine du degré de dissociation élevé des molécules d'eau, qui est un million de fois plus grand que dans l'eau liquide (FRIPIAT *et al.*, 1965 ; TOUILLAUX *et al.*, 1968). Cette observation est reliée à deux groupes de phénomènes : d'une part, la mobilité importante des protons dans les argiles hydratées (DUCROS et DUPONT, 1964 ; FRIPIAT *et al.*, 1965 ; MAMY, 1968 ; WOESSNER et SNOWDEN, 1969), d'autre part, les transformations chimiques subies par les molécules adsorbées. Il a été montré que l'ammoniac se transformait en ammonium

(MORTLAND *et al.*, 1963 ; MORTLAND, 1968 *a*, 1968 *b*) et que cette transformation dépendait de la nature des cations, augmentant suivant l'ordre $K^+ < Na^+ < Li^+$ (MORTLAND, 1968 *a*). Des ions complexes comme la cobaltihexamine, des molécules organiques comme les amines, sont décomposés avec formation d'ammonium (CHAUSSIDON *et al.*, 1962 ; CHAUSSIDON et CALVET, 1965).

3. — *Énergie moyenne d'interaction cation-eau*

Le calcul de l'énergie d'interaction entre une molécule d'eau et le milieu donne une propriété localisée à l'endroit où la molécule a été située. Il faut donc combiner l'ensemble des propriétés locales pour pouvoir atteindre les propriétés du feuillet. Une loi de combinaison nous est donnée par la distribution des différents états de l'eau (c'est-à-dire par la distribution des différents types de molécules d'eau m_{I_a}, m_{II_a},...).

Une énergie d'interaction moyenne peut être définie de la façon suivante : soient n_i le nombre moyen, par cation, de molécules du type i, et E_i l'énergie d'interaction cation-eau correspondante. L'énergie moyenne est :

$$WH_1 = \sum_i n_i \cdot E_i.$$

Pour le mode de répartition TD de l'état 1 par exemple :

$$WH_1 = 1{,}553 \times \text{Énergie (cation-molécule } m_{I_a}) + 0{,}420 \times \text{Énergie (cation-}m_{II_a}) + \ldots$$

Compte tenu des renseignements obtenus lors de l'étude des états 1 et 2, les différentes énergies moyennes peuvent être calculées. Elles sont données dans le tableau 10 (les valeurs correspondent à l'hydratation d'un cation).

TABLEAU 10

Energie moyenne d'hydratation des cations compensateurs

		Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
État 1	Répartition TD	— 65,5	— 54,2	— 40,8	— 36,5	— 34,6
WH_1 kcal mole^{-1}	Répartition TA	— 65,1	— 53,5	— 36,8	— 32,4	— 28,4
État 2	1ere description	— 78,6	— 67,3	— 54,7	— 51,1	— 44,7
WH_2 kcal mole^{-1}	2e description	— 140,8	— 111,8	— 82,1	— 71,6	— 63,0

B. — HYDRATATION DE L'ARGILE

Les résultats expérimentaux montrent que le développement de l'hydratation se fait en deux étapes pour les cations Li^+ et Na^+ et parfois K^+, et reste limité à une seule étape pour les cations Rb^+ et Cs^+. Compte tenu des teneurs en eau peu

élevées, l'espace interlamellaire passe donc successivement de l'état anhydre aux états hydratés 1 et 2.

1. — *Passage de l'état anhydre à l'état 1*

a) *Cohésion entre les feuillets et hydratation des cations.*

La variation, à pression relative constante ($p/p_0 = 0{,}30$), de la proportion de feuillets écartés en fonction de la nature du cation est donnée dans la figure 20. L'écartement des feuillets est le résultat de deux effets compétitifs :

— La cohésion entre les feuillets qui diminue dans l'ordre

$$Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+ \text{ (§ II C.)}$$

— L'hydratation de la surface interne de l'argile qui dépend étroitement de l'énergie d'hydratation des cations, laquelle décroît suivant l'ordre

$$Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+.$$

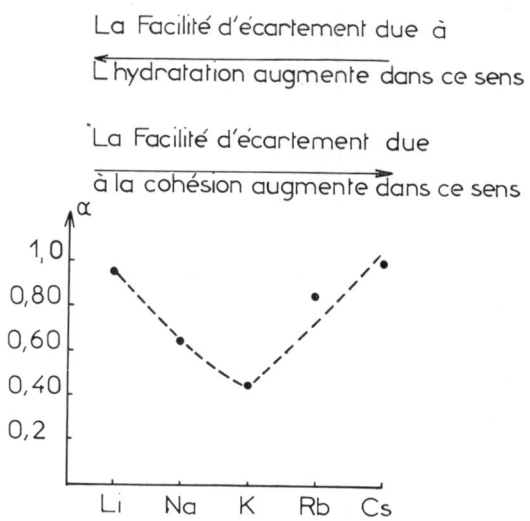


FIG. 20. — *Variation de la proportion de feuillets écartés en fonction de la nature du cation compensateur*
L'écartement correspond à l'état 1

Du point de vue thermodynamique, l'adsorption de l'eau peut être représentée par la réaction :

$$[\text{argile anhydre}] + [H_2O]\ \text{gaz} \overset{Ke}{\rightleftarrows} [\text{Argile hydratée}]$$

où nous appelons argile hydratée, l'argile correspondant à des feuillets écartés.

Si n est le nombre de molécules d'eau adsorbées dans l'espace interlamellaire par molécule d'argile, la variation d'énergie libre molaire est :

$$\Delta F = \Delta \overline{F}_m + n\,\Delta \overline{F}_\omega \qquad (4)$$

avec : $\Delta F < 0$ si des feuillets s'écartent.

$\Delta \overline{F}_m$: variation d'énergie libre molaire partielle de l'argile. Elle augmente quand les feuillets s'écartent car il faut vaincre l'énergie de cohésion E_c donc $\Delta \overline{F}_m > 0$.

Comme E_c (Li) > E_c (Na) > E_c (K) > E_c (Rb) > E_c (Cs), on a :

$$\Delta\overline{F}_m \text{ (Li)} > \Delta\overline{F}_m \text{ (Na)} > \Delta\overline{F}_m \text{ (K)} > \Delta\overline{F}_m \text{ (Rb)} > \Delta\overline{F}_m \text{ (Cs)}.$$

$\Delta\overline{F}_\omega < 0$ = variation d'énergie libre molaire partielle de l'eau égale à RT log p/p_0.

Étant des fonctions croissantes de la constante d'équilibre Ke | ΔF_ω | et α, la proportion de feuillets écartés, varient dans le même sens.

Soit deux argiles, l'une saturée par des cations A, l'autre saturée par des cations B, et ΔF_a et ΔF_b les variations d'énergie libre molaire correspondantes. On a :

$$\Delta F\ (a) - \Delta F\ (b) = \Delta\overline{F}_m\ (a) - \Delta\overline{F}_m\ (b) + n_a\, \Delta\overline{F}_\omega\ (a) - n_b\, \Delta\overline{F}_\omega(b)$$

Si la comparaison est faite à pression relative constante :

$$\Delta\overline{F}_\omega\ (a) = \Delta\overline{F}_\omega\ (b) = \Delta\overline{F}_\omega$$

et
$$\Delta F\ (a) - \Delta F\ (b) = \Delta\overline{F}_m\ (a) - \Delta\overline{F}_m\ (b) + (n_a - n_b)\, \Delta\overline{F}_\omega \qquad (5)$$

Comparons l'argile Li et l'argile K ($p/p_0 = 0{,}30$) :

α Li > αK, donc | ΔF (Li) | > | ΔF (K) | et ΔF (Li) < ΔF (K)

L'équation (5) conduit à :

$$\Delta\overline{F}_m \text{ (Li)} - \Delta\overline{F}_m \text{ (K)} + (n\text{Li} - n\text{K})\, \Delta\overline{F}_\omega < 0$$

Comme $\Delta\overline{F}_m$ (Li) — $\Delta\overline{F}_m$ (K) > 0, il faut donc nLi > nK, ce qui est vérifié expérimentalement, car nLi = 3,85 et nK = 2,39. (Nous avons pris pour la masse moléculaire de l'argile la masse de la maille).

Pour l'argile Cs nous avons nCs = 1,21. La comparaison avec l'argile K donne n Cs > nK αCs > αK, ce qui impose, compte tenu de l'équation (5) que $\Delta\overline{F}_m$ (Cs) < $\Delta\overline{F}_m$ (K). Ceci est conforme au classement donné précédemment.

Ainsi, le nombre de feuillets écartés dans une argile K est plus petit que
— dans une argile Li, car celle-ci s'hydrate plus,
— dans une argile Cs, car celle-ci est caractérisée par une énergie de cohésion interfeuillets plus faible.

b) *Caractéristiques de l'adsorption de l'eau.*

α) *Adsorption multimoléculaire.*

Prenant en considération les contraintes stériques liées à l'espace interlamellaire et les données énergétiques précédemment obtenues, il est possible d'introduire la notion d'adsorption multimoléculaire.

Quand des feuillets sont écartés, le volume de l'espace interlamellaire reste constant tant que l'état 1 existe. Pour des raisons stériques l'adsorption se développe donc parallèlement à la surface et pour des raisons énergétiques, autour des cations. Ceci, car au début de l'adsorption, la probabilité de présence d'une molécule près d'un cation est élevée (état énergétique plus stable). Cependant, compte tenu des différents types de populations de molécules qui caractérisent l'état 1, et de l'échange possible entre ces populations, il peut y avoir coexistence de molécules qui se trouvent à différentes distances des cations, même quand l'espace interlamellaire est partiellement rempli.

Ainsi il est possible de définir une adsorption multimoléculaire en décrivant l'adsorption par la formation de couronnes de molécules centrées sur les cations. Les couronnes sont alors équivalentes aux couches moléculaires qui se développent sur une surface normalement accessible et peuvent être le siège d'échanges moléculaires.

β) Énergie d'adsorption.

Au cours de l'adsorption, les molécules d'eau occupent préférentiellement les positions voisines des cations, puis les positions éloignées. La nature de l'énergie correspondant à l'adsorption d'une molécule d'eau est donc variable.

La fixation des premières molécules d'eau dans l'espace interlamellaire modifie les interactions multiples qui caractérisent l'état anhydre (écartement entre les feuillets, modification de la position des cations), et fait apparaître de nouvelles interactions avec les molécules d'eau. L'énergie d'adsorption E_{ad} est alors le résultat du bilan de toutes les variations des énergies d'interaction. Si nous désignons par $\mathcal{E}_0$ et $\mathcal{E}_1$ la somme des énergies d'interaction relatives aux cations dans l'état anhydre et dans l'état hydraté (état 1) on a :

$$E_{ad} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_0$$

où

$$\mathcal{E}_0 = \text{Interaction (cation-réseau)} + \text{Interaction (cation-cation)}$$
$$\mathcal{E}_1 = \text{Interaction (cation-réseau)} + \text{Interaction (cation-cation)} + \text{Interaction (cation-eau).}$$

Pour évaluer $\mathcal{E}_0$ et $\mathcal{E}_1$ il faut disposer d'une description globale de l'espace interlamellaire. Une estimation peut être proposée en utilisant le modèle défini pour le calcul de l'énergie E_c (paragraphe II C). Ce modèle est constitué par deux cations et tient compte de l'énergie moyenne de répulsion $Wrep_m$ et de l'énergie moyenne d'interaction avec l'eau : WH_1 (tabl. 10). $\mathcal{E}_0$ et $\mathcal{E}_1$ s'écrivent :

$$\mathcal{E}_0 = 2\,[(WFI)_0 + (WFS)_0] + (Wrep_m)_0$$
$$\mathcal{E}_1 = 2\,[(WFI)_1 + (WFS)_1 + WH_1] + (Wrep_m)_1.$$

Les valeurs de WFI et WFS sont tirées des graphiques A 12 et A 10 (Annexe II) ; celles de $Wrep_m$ sont calculées comme dans le paragraphe II B 2. Pour $\mathcal{E}_0$, les cotes des cations sont celles de l'état anhydre (tabl. 6) ; pour $\mathcal{E}_1$, les cotes sont les valeurs moyennes obtenues à partir des fonctions d'énergie potentielle des cations (Annexe IV) et sont données dans le tableau 14 du chapitre II [1].

Le tableau 11 donne les valeurs de $\mathcal{E}_0$, $\mathcal{E}_1$ et E_{ad} pour les deux modes de superposition des molécules d'eau (TD et TA).

Quand l'hydratation se poursuit, les molécules d'eau occupent les positions éloignées des cations et l'énergie d'adsorption ne fait intervenir que l'interaction avec les molécules d'eau (WLE) ou avec le réseau (WLR). Les énergies sont alors de 8 à 11 kcal $mole^{-1}$, valeurs qui sont voisines de l'énergie de liquéfaction de l'eau.

Il apparaît donc que l'énergie mise en jeu par l'adsorption d'une molécule varie très peu lorsque la quantité d'eau fixée augmente (passage des énergies E_{ad} aux énergies WLE et WLR), et qu'elle dépend faiblement de la nature des cations compensateurs. Cette constatation, jointe au caractère multimoléculaire qu'il est possible d'attribuer à l'adsorption de l'eau fait que celle-ci présente des caractéristiques en accord avec les conditions d'application de la théorie de B. E. T. Ceci peut expliquer l'obtention de graphiques tels que ceux montrés dans la figure 2. Étant donné, cependant, que les surfaces qui s'en déduisent sont inexactes, il nous

[1] Publié dans le prochain numéro des *Annales agronomiques*.

faut penser soit que la vérification du formalisme de B. E. T. est purement fortuite, soit que la signification du paramètre v_m doit être réadaptée au cas de l'hydratation de la montmorillonite.

TABLEAU II

Calcul des énergies E_{ad}

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
$(WFI)_0 + (WFS)_0$..	— 179,7	— 179,7	— 161,8	— 164,4	— 157
$(Wrep_m)_0$	+ 60,6	+ 60,6	+ 54,8	+ 58,0	+ 58,8
$\mathcal{E}_1$	— 298,8	— 298,8	— 268,9	— 270,8	— 255,2
$(WFI)_1 + (WFS)_1$..	— 145,0	— 145,1	— 145,1	— 145,3	— 143,8
$(Wrep_m)_1$	+ 44,5	+ 40,9	+ 40,9	+ 42,5	+ 48,1
WH_1 (TD)	— 65,5	— 54,2	— 40,8	— 36,5	— 34,6
WH_1 (TA)	— 65,1	— 53,5	— 36,8	— 32,4	— 28,4
$\mathcal{E}_1$ (TD)	— 376,5	— 357,8	— 330,9	— 321,2	— 308,7
$\mathcal{E}_1$ (TA)	— 375,8	— 356,3	— 322,9	— 312,9	— 296,2
E_{ad} (TD)	— 14,5	— 11,0	— 11,6	— 9,4	— 10,0
E_{ad} (TA)	— 15,3	— 11,4	— 12,0	— 9,4	— 9,2

E_{ad} (TD) et E_{ad} (TA) sont exprimées en Kcal/molécule d'eau (les nombres de molécules par cations sont 2,68 pour le mode TD ; 2,52 et 2,14 pour le mode TA).

c) *Un schéma de répartition des molécules d'eau.*

Dans les deux paragraphes précédents, nous n'avons pas parlé de la répartition des molécules d'eau sur la totalité de la surface de l'argile. Du fait de sa grande accessibilité, la surface externe doit être hydratée avant la surface interne. De plus, l'existence d'une adsorption du type multimoléculaire entraîne la présence simultanée de molécules dans différents états. Cependant, pour simplifier, nous supposerons que les molécules hydratent tout d'abord les cations qui se trouvent dans les espaces interlamellaires accessibles. Quand le nombre de molécules est suffisant pour assurer l'hydratation complète de ces cations, il y a apparition de l'eau dite de remplissage qui correspond aux molécules éloignées des cations. Nous pouvons donc considérer que le remplissage de l'espace interlamellaire commence quand il y a une couche d'eau complète sur la surface externe et que les cations situés sur les surfaces internes sont hydratés en moyenne par 2,68 molécules d'eau (§ III B), soit pour les teneurs en eau (p. 100) :

$$Li^+ : < 6,5 ; \quad Na^+ : 5 ; \quad K^+ : 5 ; \quad Rb^+ : 6 ; \quad Cs^+ : 8.$$

Étant donné la nature des interactions qui caractérisent l'eau de remplissage les molécules qui la constituent sont moins fortement liées. L'étude thermique de la déshydratation (HENDRICKS *et al.*, 1940) met en évidence l'existence d'une eau faiblement liée qui apparaît aux teneurs suivantes (p. 100) :

$$Li^+ : 6,5 ; \quad Na^+ : 4\text{-}5 ; \quad K^+ : 5,5\text{-}8 ; \quad Cs^+ : 6,5\text{-}8.$$

La concordance entre ces deux séries de valeurs montre que l'hydratation des cations des surfaces internes est le phénomène dominant au début de l'adsorption de l'eau dans l'espace interlamellaire. Cela n'exclut évidemment pas l'existence de liaisons intermoléculaires dont l'importance doit augmenter du lithium au césium.

2. — *Passage de l'état 1 à l'état 2*

Pour une pression de vapeur d'eau donnée, l'état 2 ne peut se former que s'il est plus stable que l'état 1. La possibilité du passage peut être étudiée en déterminant la variation d'énergie correspondante. Nous l'estimerons comme précédemment, en ne tenant compte que des interactions relatives aux cations.

La variation d'énergie est : $E_t = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$.

$\mathcal{E}_1$ a été calculée précédemment.

$\mathcal{E}_2$ est déterminée en utilisant le même modèle et en négligeant les termes WFS et $Wrep_m$. En effet, ils deviennent faibles et leur introduction est difficile en raison des effets d'écran des molécules d'eau. L'erreur correspondante n'est certainement pas élevée car ces deux termes sont petits par rapport aux autres, du même ordre de grandeur et de signe contraire.

On a donc : $\mathcal{E}_2 = 2\,[(WFI)_2 + WH_2]$.

Le tableau 12 donne $\mathcal{E}_2$ pour les deux descriptions de l'état 2 et les différentes valeurs de E_t correspondantes.

TABLEAU 12

Calcul des énergies E_t

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
$\mathcal{E}_2$ (1)	— 410,8	— 391	— 365,8	— 357,7	— 337,7
$\mathcal{E}_2$ (2)	— 455,6	— 395,6	— 331,2	— 308,0	— 288,0
$\mathcal{E}_2$ (1) — $\mathcal{E}_1$ (TD) ...	— 34,3	— 33,2	— 34,9	— 36,5	— 29,0
$\mathcal{E}_2$ (1) — $\mathcal{E}_1$ (TA) ...	— 35,0	— 34,7	— 42,9	— 44,8	— 41,5
$\mathcal{E}_2$ (2) — $\mathcal{E}_1$ (TD) ...	— 79,1	— 37,8	— 0,3	+ 13,2	+ 20,7
$\mathcal{E}_2$ (2) — $\mathcal{E}_1$ (TA) ...	— 79,8	— 39,3	— 8,3	+ 4,9	+ 8,2

Les énergies $\mathcal{E}_2$ et $\mathcal{E}_1$ sont exprimées en kcal pour 2 ions.

$E_t < 0$ signifie que la variation d'énergie d'interaction relative au cation est favorable à la transition.

$E_t > 0$ la variation est défavorable à la transition.

Le signe de E_t ne représente que le rôle favorable ou non du cation vis-à-vis de la transition. Cependant, la contribution des cations doit être importante, car les interactions entre les réseaux sont faibles (d_{001} = 15,5 Å).

Expérimentalement, l'état 2 n'est observé que pour Li^+ et Na^+. Pour ces deux cations, E_t doit donc être négatif, et pour K^+, Rb^+ et Cs^+, il doit être positif. Les

valeurs de $\mathcal{E}_1$ et $\mathcal{E}_2$ qui correspondent le mieux à cette classification sont $\mathcal{E}_1$(TD) et $\mathcal{E}_2$(2). Le mode de répartition TD des molécules d'eau représenterait donc l'état 1, la deuxième description, l'état 2. Ainsi disposons-nous d'un élément d'explication à l'écartement limité des feuillets quand les cations compensateurs sont Rb^+ et Cs^+. Pour K^+, E_t est voisin de zéro et signifie que l'aptitude à l'écartement est fort réduite. Celle-ci est plus importante quand le mode de répartition des molécules est TA. Nous sommes en présence d'un exemple montrant comment l'effet d'un traitement peut intervenir sur le gonflement de l'argile K en favorisant un certain arrangement des molécules d'eau. Cette propriété, jointe au fait que l'écartement des feuillets saturés par K^+ est le plus difficile (§ B 1 précédent), peut être à l'origine des propriétés d'échange d'ions particulières qui sont parfois considérablement réduites (phénomène de rétrogradation).

3. — *Vue d'ensemble sur l'adsorption de l'eau*

L'adsorption se déroule suivant plusieurs phases successives qui mettent en jeu les interactions différentes. Il en résulte que $\Delta\overline{F}_\omega$, la variation d'énergie libre molaire partielle de l'eau adsorbée doit refléter ces différentes phases. L'étude de

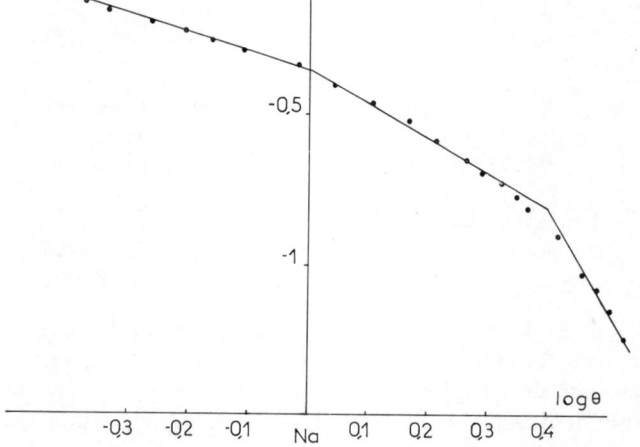


FIG. 21. — *Représentation de* HALSEY *pour l'argile sodique*

$\Delta\overline{F}_\omega$ peut être faite commodément en utilisant le formalisme développé par HALSEY (1948). Il consiste à exprimer l'isotherme d'adsorption sous la forme :

$$p/p_0 = \exp\,(-a\theta^{-r}/RT)$$

où θ est le degré de recouvrement exprimé en multiples de la quantité d'eau fixée sous la pression relative $p/p_0 = 1/e$; a et r sont des constantes.

Étant donné que :

$$-\Delta\overline{F}_\alpha = RT \log (p_0/p)$$

la fonction $\log \log (p_0/p) = f(\log \theta)$ permet d'obtenir la variation de $\Delta\overline{F}_\omega$ en fonction de la quantité d'eau adsorbée. La figure 21 donne un exemple pour l'argile Na

et montre l'existence de plusieurs domaines pour lesquels la variation de $\Delta\overline{F}_\omega$ en fonction de θ est constante. Pour les argiles saturées par Li^+, Na^+, K^+, Rb^+ et Cs^+, ces différents domaines sont représentés schématiquement dans la figure 22.

Trois types de domaines apparaissent et leur signification peut être donnée en tenant compte des résultats de la diffraction des rayons X et de la répartition des molécules d'eau :

— domaine I : les interactions cation-eau sont dominantes ;
— domaine II : les interactions sont dues à la fois aux cations et aux molécules d'eau ;
— domaine III : les interactions entre les molécules sont dominantes.

Pour les argiles saturées par Na^+, K^+ et Rb^+, l'importance des domaines I et II diminue dans l'ordre $Na^+ > K^+ > Rb^+$. Avec le sodium, les limites du domaine II correspondent au début (10 p. 100 d'eau) et à la fin (23 p. 100 d'eau) du passage

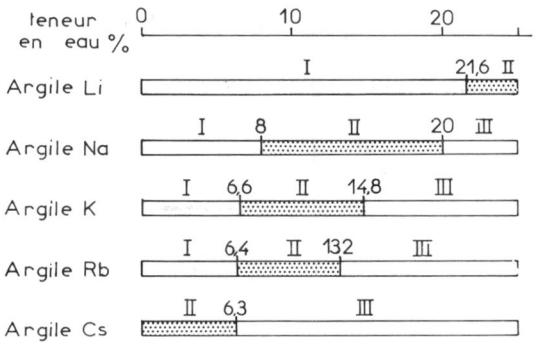


FIG. 22. — *Différents domaines relatifs aux variations de* $\Delta\overline{F}_w$

de l'état 1 à l'état 2 tel qu'il se manifeste par la variation de *d*001 en fonction de la teneur en eau. Avec le potassium et le rubidium, la limite inférieure correspond à l'apparition de l'eau de remplissage et la limite supérieure coïncide probablement avec l'adsorption de molécules sur des sites où le champ électrique du cation devient négligeable.

Dans les conditions expérimentales utilisées, les argiles, lithiques et césiques représentent des cas extrêmes. Le pouvoir polarisant du lithium permet d'expliquer à la fois l'absence du domaine III et la limite du domaine I. Celle-ci correspond à la fin de l'établissement de l'état 2 (25 p. 100 d'eau) comme l'indique la diffraction des rayons X. Avec le césium, le premier domaine n'existe pas car le champ électrique du cation est suffisamment faible pour être en compétition avec celui des molécules d'eau dès le début de l'adsorption. La limite supérieure du domaine II peut avoir la même signification que précédemment.

L'importance de chaque domaine est donc sous l'étroite dépendance du pouvoir polarisant des cations et est déterminée par les propriétés des populations de molécules d'eau adsorbées sur l'argile.

V. — CONCLUSION DU CHAPITRE I

Au cours de l'hydratation, l'eau se répartit sur les surfaces externes et sur les surfaces internes en provoquant l'écartement des feuillets de la montmorillonite. Dans ces conditions, deux types de mesures sont essentiels. Ce sont d'une part, les isothermes d'adsorption, d'autre part, la détermination de l'espacement interfeuillets. Trois observations sont particulièrement importantes :

— L'adsorption de l'eau dépend étroitement de la nature des cations compensateurs.

— L'écartement des feuillets prend successivement des valeurs qui permettent de caractériser plusieurs états d'hydratation. Les deux premières valeurs sont voisines de un et deux diamètres moléculaires de l'eau.

— Les feuillets sont écartés alors que les espaces interlamellaires sont incomplètement remplis.

Il importe de souligner que l'adsorption de l'eau modifie les propriétés de l'argile, et d'un point de vue pratique, il en résulte que l'utilisation du formalisme de la théorie de BRUNAUER, EMMETT et TELLER ne permet pas de déterminer les surfaces internes.

La facilité avec laquelle les feuillets s'écartent au début de l'adsorption dépend de la compétition entre l'hydratation des cations et la cohésion des feuillets. Quand ils sont écartés par les premières molécules d'eau adsorbées, l'espace interlamellaire se remplit progressivement en constituant un état d'hydratation souvent appelé état à « une couche ». L'évolution de l'hydratation est ensuite limitée par les cations Rb^+ et Cs^+, pour lesquels l'écartement des feuillets ne varie plus, alors que pour le lithium et le sodium, il y a formation d'un nouvel état d'hydratation appelé état à « deux couches ». L'argile potassique présente un comportement particulier qui mérite d'être signalé. L'établissement de l'état à « deux couches » dépend des traitements subis par cette argile, car l'évolution au-delà de l'état à « une couche » est très étroitement liée à l'arrangement des molécules d'eau dans l'espace interlamellaire. Ces différences dans le développement de l'hydratation tiennent à la nature des cations compensateurs et s'expliquent à la lumière de l'étude précédente. La connaissance des états énergétiques des molécules d'eau, jointe à la définition d'une hydratation moyenne des cations, permet en effet d'évaluer les variations d'énergie qui caractérisent les étapes successives de l'adsorption. Par exemple, nous avons montré que l'argile césique dans un état à « deux couches » constituait un système moins stable que dans un état à « une couche », ce qui explique l'hydratation limitée d'une montmorillonite saturée par le césium.

Globalement, l'énergie d'adsorption de l'eau varie peu au cours de l'adsorption, mais sa nature évolue. Déterminée par le champ électrique du cation au début de l'hydratation, elle devient de plus en plus conditionnée par les interactions intermoléculaires. L'allure et la nature de cette évolution dépendent du pouvoir polarisant des cations compensateurs.

Une telle étude conduit nécessairement à proposer une description de l'arrangement des molécules d'eau sur la surface des feuillets. L'existence de plusieurs

états énergétiques impose que les molécules soient réparties en plusieurs populations. Celles-ci peuvent être regroupées en deux classes : les populations de molécules voisines des cations et les populations de molécules qui en sont éloignées. Il existe des échanges permanents entre ces populations et leur importance dépend du pouvoir polarisant des cations. Cette conception conduit à représenter l'adsorption de l'eau comme une adsorption multimoléculaire, et à considérer que l'eau adsorbée ne peut pas être décrite à l'aide d'un schéma structural unique pas plus qu'avec un modèle de liquide bidimensionnel.

Reçu pour publication en mai 1972.

SUMMARY

HYDRATION OF MONTMORILLONITE AND DIFFUSION OF EXCHANGEABLE CATIONS

I. — HYDRATION OF MONTMORILLONITE SATURATED BY MONOVALENT CATIONS

The amounts of adsorbed water and the d_{001} values determined by X-ray diffraction represent the experimental data. The main results are :

— the importance and the evolution of the adsorption of water are closely related to the nature of the exchangeable cations ;
— the hydration of montmorillonite takes place either in one or two steps under the experimental conditions used ;
— the swelling depends upon the competition between the interlamellar cohesion and the cation hydration.

The interpretation of these observations is based on the description of the anhydrous state and of the hydrated states using the different interaction energies which characterize the clay-water system. The analysis of the energies shows that the interaction between the water molecules and the exchangeable cations are the most important. It also appears that the description of adsorbed water must take into account the distribution of water molecules among several populations, the properties of which are mainly dependent on the polarising power of the cations.

ZUSAMMENFASSUNG

HYDRIERUNG DES MONTMORILLON — TONS UND DIFFUSION DER KOMPENSATIONS — KATHIONE

I. — UNTERSUCHUNG DER HYDRIERUNG DES GESAETTIGTEN MONTMORILLONIT DURCH EINWERTIGE KATHIONE

Die Aufgenommenen Wässermengen sowie die Wertungen der Interlamellar-Anstaende durch Roentgendiffraktion bestimmt, bilden die Versuchdaten. Die qichtigsten Ergebnisse sind :
— Die Groesse der Wasser-Adsorbtion und deren Bedingungen haengen sehr eng mit der Art der Kompensations-Kathione zusammen.
— Die Entwicklung der Hydirierung erfolgt Schrittweise.
— Der Blaettchenabstand ghaent ab von dem Wettbewerb zwischen den Kohesionskraeften zwischen den Blaettchen und der Auswirkungen der Hydrierung der Kathione.
Die Deutung der Bäobachtungen beruht auf der Beschreibung des Anhydrischen (Wasserlosen) Zu tandes und der Hydrierten (gewaesserten) Sustaende mit Hilfe der verschiedenen Gegenwirkungsenergien die das System Ton-Wasser — charakterisieren. Es wird klar ebenfalls, dass das adsorbierte (aufgenommene) Wasser beschrieben werden muss indem man die Molekuele als in mehrere B voelkerungen aufgeteilt betrachtet, deren Eihgenschaften von dem Polarisierungs-Vermogen der Kathione abhaengt.

РЕЗЮМЕ

Гидратация монтмориллонита и диффузия катионов-компенсаторов. I — Изучение гидратации монтмориллонита, насыщенного моновалентными катионами.

Р. КАЛЬВЭ.

Количества адсорбированной влаги и величины междуслоевых промежутков, определенные при помощи диффракции Рентгеновских лучей, являются экспериментальными данными. Главные результаты изучения сводятся к следующему :

— Количество адсорбированной влаги и форма адсорбции находятся в тесной зависимости от природы катионов-компенсаторов.

— Гидратация развивается по этапам.

— Расстояние между пластинками зависит от соревнования между силами спаивающими пластинки и эффектами гидратации катионов.

Интерпретация этих наблюдений основывается на описании безводного и гидратного состояний с помощью разных энергий взаимодействия, характерных для системы глина — вода. Ясно также, что адсорбированная влага должна описываться, принимая во внимание тот факт, что молекулы разделяются на несколько различных популяций, свойства которых зависят от поляризующей силы катионов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AHLRICHS J. L., RUSSELL J. R., HARTER R. D., WEISMILLER R. A., 1966. Infrared spectroscopy of clay mineral systems. *Proc. Indiana Acad. Sci.*, **75**, 247-255.

AKITT J. W., DOWNS A. J., 1967. ^{7}Li nuclear magnetic resonance studies of the solvation of lithium ions. *London Chem. Soc.*, « Alkali metals Int. Symp. Nottingham », 199-206.

ANDERSON D. M., HOEKSTRA P., 1965. Migration of interlamellar water during freezing and thawing of Wyoming bentonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29** (5), 498-504.

ANDERSON D. M., 1966. Phase composition of frozen montmorillonite-water mixtures from heat capacities measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 670-675.

ANDERSON D. M., 1968. Under cooling, freezing point depression and ice nucleation of soil water. *Israel J. Chem.*, **6**, 349-356.

BADER R. F. W., JONES G. A., 1961. The Hellmann-Feynman theorem and chemical binding. *Can. J. Chem.*, **39**, 1253-1265.

BADER R. F. W., JONES G. A., 1963. The electron density distributions in hydride molecules. I. The water molecule. *Can. J. Chem.*, **41**, 586-606.

BANIN A., LAHAV N., 1968. Optical study of particle size of montmorillonite with various adsorbed cations. *Nature*, **217**, 1146-1147.

BASOLO F., PEARSON R. G., 1960. *Mechanisms of inorganic reactions.* 462 p., John Wiley and Sons, New York.

BERENDSEN H. J. C., 1967. Water structure. *Theor. exp. biophys.*, **1**, 1-76.

BERNAL J. D., FOWLER R. H., 1933. A theory of water and ionic solution, with particular reference to hydrogen and hydroxyl ions. *J. Chem. Phys.*, **1** (8), 515-548.

BISHOP D. M., RANDIC M., 1966. A theoretical investigation of the water molecule. *Mol. Phys.*, **10** (6), 517-527.

BRADY G. W., 1958. Structure in ionic solutions. II. *J. Chem. Phys.*, **28** (3), 464-469.

BRINDLEY G. W., RAY S., 1964. Complexes of Ca-montmorillonite with primary monohydric alcohols. *Amer. Miner.*, **49**, 106-115.

BROWN G., 1961. *The X-Ray identifications and crystal structures of clay minerals.* 544 p., Mineralogica Society. London.

BRUNAUER S., EMMETT P. H., TELLER F., 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. Amer. Chem. Soc.*, **60**, 309-319.

BRUNAUER S., 1945. *Physical adsorption. The adsorption of gases and vapor.* 511 p., Princeton Univ. Press.

BRUNAUER S., 1961. Solid surfaces and the solid-gas interface. Solid Surfaces. *Adv. in chemistry series*, **33**, 5-18.

BUCKINGHAM A. D., 1957. A theory of ion solvent interaction. *Disc. Farad. Soc.*, **24**, 151-157.

BUIJS K., CHOPPIN G. R., 1963. Near infrared study of the structure of water. I. Pure water. *J. Chem. Phys.*, **39** (8), 2035-2041.

BURNELLE L., COULSON C. A., 1957. Bond dipole moments in water and ammonia. *Trans. Farad. Soc.*, **53**, 403-405.

BURTON R. E., DALY J., 1970. Molecular orbital studies of ion hydration. Part 1. Lithium, beryllium, sodium and magnesium ions. *Trans. Farad. Soc.*, **66**, 1281-1288.

CALVET R., PROST R., 1971. Cation migration into empty octahedral sites and surface properties of clays. *Clays and clay Minerals* **19**, 175-186.

CHAUSSIDON J., CALVET R., HELSEN J., FRIPIAT J. J., 1962. Catalytic decomposition of cobalt (III) hexammine cations on the surface of montmorillonite. *Nature*, **196**, 161-162.

CHAUSSIDON J., CALVET R., 1965. Evolution of amine cations adsorbed on montmorillonite with dehydration of the mineral. *J. Phys. Chem.*, **69**, 2265-2268.

COULSON C. A., EISENBERG D., 1966. Interaction of H_2O molecules in ice. I. The dipole moment of an H_2O molecule in ice. *Proc. Roy. Soc.*, **291** A, 445-453.

COULSON C. A., EISENBERG D., 1966. Interaction of H_2O molecules in ice. II. Interaction energies of H_2O molecules in ice. *Proc. Roy. Soc.*, **291** A, 454-459.

DELBENE J., POPLE J. A., 1970. Theory of molecular interactions. I. Molecular orbital studies of water polymers using a minimal slater type basis. *J. Chem. Phys.*, **52** (9), 4858-4866.

DUCROS P., DUPONT M., 1964. Étude par RMN de l'évolution thermique aux basses températures de l'eau d'hydratation de la montmorillonite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **14** (9), 99-104.

DUNCAN A. B. F., POPLE J. A., 1953. The structure of some simple molecules with lone pair electrons. *Trans. Farad. Soc.*, **49**, 217-224.

EIRISH M. V., TRET'YAKOVA L. I., 1970. The role of sorptive layers in the formation and change of the crystal structure of montmorillonite. *Clays Minerals*, **8**, 255-266.

EISENBERG D., KAUZMANN W., 1969. *The structure and properties of water.* 296 p., Clarendon Press, Oxford.

ELEY D. D., EVANS M. G., 1938. Heats and entropy changes accompanying the solution of ions in water. *Trans. Farad. Soc.*, **34**, 1093-1112.

ELLISON F. O., SHULL H., 1955. Molecular calculations. I. LCAO-MO self-consistent field treatment of the ground state of H_2O. *J. Chem. Phys.*, **23** (12), 2348-2364.

EMERSON W. W., 1957. Organo-clay complexes. *Nature*, **180**, 48-49.

FARMER V. C., RUSSELL J. D., 1964. The infrared spectra of layer silicates. *Spectrochem. Acta.* **20**, 1146-1173.

FARMER V. C., RUSSELL J. D., 1967. Infrared absorption spectrometry in clay studies. *Clays and clay Minerals*, **15**, 121-142.

FRANK H. S., WEN YANG WEN, 1957. III Ion-solvent interaction. Structural aspects of ion-solvent interaction in aqueous solutions : a suggested picture of water structure. *Disc. Farad. Soc.*, **24**, 133-140.

FRANK H. S., 1958. Covalency in the hydrogen bond and the properties of water and ice. *Proc. Roy. Soc.*, **247** A, 481-492.

FRIPIAT J. J., JELLI A., PONCELET G., ANDRÉ J., 1965. Thermodynamic properties of adsorbed water molecules and electrical conduction in montmorillonites and silicates. *J. Phys. Chem.*, **69** (7), 2185-2197.

GATINEAU L., MERING J., 1966. Relations ordre-désordre dans les substitutions des micas. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **18** (14), 67-74.

GLAESER R., 1953. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* 68 p. Thèse Fac. Sci. Paris.

GLAESER R., COULSON C. A., 1965. Multipole moments of the water molecule. *Trans. Farad. Soc.*, **61**, 389-391.

GLAESER R., MERING J., 1967. Effet du chauffage sur les montmorillonites saturées par les cations de petits rayons. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 833-835.

GLAESER R., MANTINE I., MERING J., 1967. Observations sur la beidellite. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **19** (1), 125-129.

GLAESER R., MERING J., 1968. Domaines d'hydratation homogène des smectites. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **267**, 463-466.

GONCHAROV V. V., ROMANOVA I. I., SAMOILOV O. J. A., YASHKICHEV V. I., 1967. Quantitative characteristics of the near hydration of some ions in weak aqueous solutions. I. Self diffusion activation energy. *Zh. Strukt. Khim.*, **8** (4), 613-617.

GRAHN R., 1964. A quantum mechanical investigation of the OH^- ion. *Arkiv. fur. Fysik.*, **28** (7), 85-92.

GRIM R. E., 1968. *Clay mineralogy*. 596 p., Mc Graw-Hill, New York.

GURNEY R. W., 1953. *Ionic processes in solution*. 275 p., Dover publications Inc. New York.

HAGGIS G. H., HASTED J. B., BUCHANAN T. J., 1952. The dielectric properties of water in solutions. *J. Chem. Phys.*, **20** (9), 1452-1465.

HALSEY G., 1948. Physical adsorption on non-uniform surfaces. *J. Chem. Phys.*, **16** (10), 931-937.

HARRIS F. E., O'KONSKI C. T., 1957. Dielectric properties of aqueous ionic solutions at microwave frequencies. *J. Phys. Chem.*, **61**, 310-319.

HENDRICKS S. B., JEFFERSON M. E., 1938. Structure of kaolin and talc pyrophyllite hydrates and their bearing on water sorption of the clays. *Amer. Mineral.*, **23**, 863-875.

HENDRICKS S. B., NELSON R. A., ALEXANDER L. T., 1940. Hydration mechanism of the clay mineral montmorillonite saturated with various cations. *J. Amer. Chem. Soc.*, **62**, 1457-1464.

HINDMAN J. C., 1962. Nuclear magnetic resonance effects in aqueous solutions of 1-1 electrolytes. *J. Chem. Phys.*, **36** (4), 1000-1015.

HOFMANN V., KLEMEN R., 1950. Verlust der austausch fähigkeit von lithiumionen and bentonit durch erhitzung. *Zeits. Anorg. Chem.*, **262**, 95-99.

HORSLEY J. A., FINK W. H., 1969. *Ab initio* calculation of some lowerlying excited states of H_2O. *J. Chem. Phys.*, **50** (2), 750-758.

KEMPER W. D., MAASLAND D. E. L., PORTER L. K., 1964. Mobility of water adjacent to mineral surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**, 164-167.

KITTRICK J. A., 1966. Forces involved in ion fixation by vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (6), 801-803.

KITTRICK J. A., 1969. Quantitative evaluation of the strong-force model for expansion and contraction of vermiculite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**)2), 222-225.

LENNARD-JONES J., POPLE J. A., 1951. Molecular association in liquids. I. Molecular association due to lone-pair electrons. *Proc. Roy. Soc.*, **205** A, 155-162.

LEONARD R. A., LOW P. F., 1964. Effect of gelation on the properties of water in clay systems. *Clays and clay Minerals, 12th Nat. Conf.*, 311-325.

LEUNG P. S., SAFFORD G. J., 1970. A neutron inelastic scattering investigation of the concentration and anion dependence of low frequency motions of H_2O molecules in ionic solutions. *J. Phys. Chem.*, **74** (21), 3696-3709.

LOW P. F., 1961. Physical chemistry of clay-water interaction. *Advan. Agron.*, **13**, 269-327.

LOW P. F., 1968. Observations on activity and diffusion coefficients in Na-montmorillonite. *Israel J. Chem.*, **6**, 325-336.

LOW P. F., RAVINA I., WHITE J. L., 1970. Change in *b* dimension of Na-montmorillonite with interlayer swelling. *Nature*, **226**, 445-446.

LOW P. F., WHITE J. L., 1970. Hydrogen bonding and polywater in clay water systems. *Clays and clay Minerals*, **18** (1), 63-66.

MACEY H. H., 1942. Clay-water relationship and the internal mechanism of drying. *Trans. Ceram. Soc.*, **41**, 73-121.

MCATEE J. L., 1956. Determination of random interstratification in montmorillonite. *Amer. Miner.*, **41**, 627-631.

MCNEAL B. L., NOWELL W. A., COLEMAN N. T., 1966. Effect of solution composition on the swelling of extracted soil clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 313-317.

MCNEAL B. L., 1970. Prediction of interlayer swelling of clays in mixed salt solutions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 201-206.

MC WEENY R., OHNO K. A., 1960. A quantum mechanical study of the water molecule. *Proc. Roy. Soc.*, **255** A, 367-381.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite : propriétés diélectriques et structure du film d'eau*. 113 p. Thèse Fac. Sci. Paris.

MARGENAU H., MYERS V. W., 1944. The forces between water molecules and the second virial coefficient of water. *Phys. Rev.*, **66** (11), 307-315.

MERING J., 1946. On the hydration of montmorillonite. *Trans. Farad. Soc.*, **42** B, 205-219.

MERING J., GLAESER R., 1954. Sur le rôle de la valence des cations échangeables dans la montmorillonite. *Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr.*, **77**, 519-530.

MERING J., 1964. Gonflement, dispersion et hydratation des argiles. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **14** (9), 115-123.

MERING J., BRINDLEY G. W., 1967. X-ray diffraction band profiles of montmorillonite. Influence of hydration and of the exchangeable cations. *Clays and clay Minerals.*, **27**, 51-62.

MERING J., GLAESER R., 1967. Réarrangement structural de la montmorillonite Li sous l'effet du chauffage. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 1153-1156.

MERING J., OBERLIN A., 1967. Electron-optical study of smectites. *Clays and clay minerals*, **15***th Nat. Conf.*, 3-25.

MERING J., PEDRO G., 1969. Discussion à propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **21** (1), 1-30.

MIKAULIN G. L., 1959. Interprétation thermodynamique de la théorie des hydrates dans les solutions d'électrolytes. *Zh. Fizith. Khim.*, **33** (11), 2424-2427.

MOELWYN-HUGUES E. A., 1948. Ionic hydration. *Proc. Cambridge Philoso. Soc.*, **45**, 477-481.

MOKADY R. S., LOW P. F., 1966. Simultaneous transport of water and salt through clays. I. Transport mechanisms. *Soil Sci.*, **105** (2), 112-131.

MOONEY R. W., KEENAN A. G., WOOD L. A., 1952 *a*. Adsorption of water vapor by montmorillonite. I. Heat of desorption and application of B. E. T. theory. *J. Amer. Chem. Soc.*, **74** (6), 1367-1371.

MOONEY R. W., KEENAN A. G., WOOD L. A., 1952 *b*. Adsorption of water vapor by montmorillonite. II. Effect of exchangeable ions and lattice swelling as measured by X-ray diffraction. *J. Amer. Chem. Soc.*, **74** (6), 1371-1374.

MORTLAND M. M., FRIPIAT J. J., CHAUSSIDON J., UYTTERHOEVEN J., 1963. Interaction between ammonia and the expanding lattices of montmorillonite and vermiculite. *J. Phys. Chem.*, **67**, 248-258.

MORTLAND M. M., 1968 *a*. Surface acidity of smectites in relation to hydration exchangeable cation and structure. *Clays and clay minerals*, **16**, 393-398.

MORTLAND M. M., 1968 *b*. Protonation of compounds at clay mineral surfaces. *9th Cong. Soil Sci.*, 691-698.

MULLIKEN R. S., 1955 *a*. Electronic population analysis on LCAO-MO molecular wave functions. I.. *J. Chem. Phys.*, **23** (10), 1833-1840.

MULLIKEN R. S., 1955 *b*. Electronic population analysis on LCAO-MO molecular wave functions. II. Overlap populations, bond orders, and covalent bond energies. *J. Chem. Phys.*, **23** (10), 1841-1846

MURREL J. N., STAMPER J. G., TRINAJSTIC N., 1966. Localized orbitals of water. *J. Chem. Soc.*, **11** A, 1624-1627.

MURREL J. N., 1969. The hydrogen bond. *Chem. Brit.*, **13**, 107-110.

NEMETHY G., SCHERAGA H. A., 1962. The structure of water and hydrophobic bonding in proteins. III. The thermodynamic properties of hydrophobic bonds in proteins. *J. Chem. Phys.*, **36**, 3382-3401.

NORRISH K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Disc. Farad. Soc.*, **18**, 120-134.

OBERLIN A., MERING J., 1962. Observations en microscopie et microdiffraction électroniques sur la montmorillonite Na. *J. Microscopie*, **1**, 107-120.

O'CONNOR G. A., KEMPER W. D., 1969. Quasi-crystals in Na-Ca systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33**, 464-469.

ORCHISTON H. D., 1955. Adsorption of water vapor : III. Homoionic montmorillonites at 25°C. *Soil Sci.*, **79**, 71-78.

OSTER J. D., LOW P. F., 1963. Activation energy for ion movement in thin water films on montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27** (4), 369-373.

OSTER J. D., LOW P. F., 1964. Heat capacities of clay and clay-water mixtures. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28** (5), 605-609.

OTTEWILL R. H., 1966. Attractive forces between surfaces. Aspects. *Adhes.*, **2**, 9-17.

PAULING L., 1960. *The nature of the chemical bond.* 644 p. Cornell Univ. Press, New York.

PEZERAT H., MERING J., 1967. Recherches sur la position des cations échangeables et de l'eau dans les montmorillonites. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 529-532.

POPLE J. A., 1950. The molecular orbital theory of chemical valency. V. The structure of water and similar molecules. *Proc. Roy. Soc.*, **202** A, 323-336.

POPLE J. A., 1951. Molecular associations un liquids. II. A theory of the structure of water. *Proc. Roy. Soc.*, **205** A, 163-178.

PROST R., CALVET R., 1969. Position du lithium dans une montmorillonite Li chauffée. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **269**, 539-541.

PROST R., CHAUSSIDON J., 1969. The infrared spectrum of water adsorbed on hectorite. *Clays minerals* **8**, 143-149.

PROST R., 1971. Spectres infrarouge de l'eau adsorbée sur les argiles. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **273**, 1347-1350.

RUSSELL J. D., FARMER V. C., 1964. Infrared spectroscopic study of the dehydration of montmorillonite and saponite. *Clay. Min. Bull.*, **5**, 443-464.

SALEM L., 1966. Forces intermoléculaires à long rayon d'action. *Colloque C. N. R. S.*, Septembre 1965. BORDEAUX, 79-87.

SAMOILOV O. J. A., MALENKOV G. G., 1967. Quantitative characteristics of the near hydration of some ions in weak aqueous solutions. II. Change in the orientation of water molecules near ions. *Zh. Strukt Khim*, **8** (4), 618-621.

SCHASCHEL E., DAY M. C., 1968. Ion solvent interactions. Solvation of the sodium ion. *J. Amer. Chem. Soc.*, **90** (2), 503-504.

SHAINBERG I., KEMPER W. D., 1966 *a*. Conductance of adsorbed alkali cations in aqueous and alcoholic bentonite pastes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (6), 700-706.

SHAINBERG I., KEMPER W. D., 1966. Hydration status of adsorbed cations. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (6), 707-713.

SHAINBERG I., OTOH H., 1968. Size and shape of montmorillonite particles saturated with Na-Ca ions (inferred from viscosity and optical measurements). *Israel J. Chem.*, **6**, 251-259.

SPARNAY M. J., 1966. I. Water structure and interionic interaction. *J. Colloid Int. Sci.*, **22**, 23-31.

TABOR D., WINTERTON R. H. S., 1968. Surfaces forces : Direct measurement of normal retarded Van der Waals forces. *Nature*, **219**, 1120-1121.

TARASEVICH Y. I., OVCHARENKO F. D., 1966. Nature of the interaction of water with montmorillonite surface. I. Thermal decomposition of cation substituted montmorillonite by the infrared spectroscopy method. *Ukr. Khim. Zh.*, **32** (11), 1168-1176.

TOUILLAUX R., SALVADOR P., VANDERMEERSCHE C., FRIPIAT J. J., 1968. Study of water layers adsorbed on Na and Ca montmorillonite by the pulsed nuclear magnetic resonance technique. *Israel J. Chem.*, **6**, 337-348.

VAN OLPHEN H., 1965. Thermodynamics of interlayer adsorption of water in clays. I. Sodium vermiculite. *J. Colloid Sci.*, **20**, 822-837.

VASLOW F., 1963. The orientation of water molecules in the field of an alkali ion. *J. Phys. Chem.*, **67**, 2773-2776.

VERWEY E. J. W., 1942. The interaction of water molecules in the field of an alkali ion. *J. Phys. Chem.*, **67**, 2773-2776.

VERWEY E. J. W., 1942. The interaction of ion and solvent in aqueous solutions of electolytes. *Rec. Trav. Chim.*, **61**, 127-142.

WANG J. H., 1954. Effect of ions on the self diffusion and structure of water in aqueous electrolytic solutions. *J. Phys. Chem.*, **58**, 686-692.

WOESSNER D. E., SNOWDEN B. S., 1969. A study of the orientation of adsorbed water molecules on montmorillonite clays by pulsed NMR. *J. Coll. and Interf. Sci.*, **30** (1), 54-68.

YAMADA H., 1960 *a*. Sodium iodide-acetone and zinc bromide-acetone molecular complexes. *Bull. Chem. Soc. Japan*, **33** (5), 666-669.

YAMADA H., 1970 *b*. Molecular complexes between ketones and alkali salts. *Bull. Chem. Soc. Japan* **33** (6), 780-784.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78 - Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24 . N° 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (2), 135-217.

HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE ET DIFFUSION DES CATIONS COMPENSATEURS

Chapitre II. — Étude de la diffusion des cations compensateurs dans la montmorillonite [1]

R. CALVET

Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

L'étude de la mobilité des cations compensateurs repose sur la mesure des coefficients de diffusion dans des poudres d'argile comprimées. Les coefficients sont déterminés à partir de courbes de distribution d'un traceur radioactif par une méthode d'ajustement numérique.

Les résultats expérimentaux concernent trois types de mesures :

— Mesures d'autodiffusion. Elles montrent que les mobilités cationiques se classent dans l'ordre suivant : $Cs^+ < Rb^+ < Na^+$. Plus l'argile est hydratée, plus elles sont élevées.

— Mesures d'hétérodiffusion à dilution infinie. Les coefficients mesurés se rapportent à la diffusion du sodium dans des argiles saturées par Li^+, K^+, Rb^+, Cs^+ et Ca^{++} et à la diffusion du rubidium dans des argiles saturées par Li^+, Na^+, K^+ et Cs^+. Ils sont également une fonction croissante de la teneur en eau du minéral et mettent en évidence le fait suivant : un cation diffuse d'autant moins que son affinité pour l'eau est faible par rapport à l'affinité pour l'eau des autres cations du milieu.

— Mesures d'hétérodiffusion. C'est la diffusion du sodium et du calcium dans des argiles biioniques qui a essentiellement fait l'objet de ces mesures. Elles font apparaître que le coefficient de diffusion du sodium diminue quand la teneur en Ca^{++} augmente et inversement que le coefficient de diffusion du calcium est d'autant plus élevé que la teneur en Na^+ est grande.

L'interprétation de l'ensemble de ces mesures est faite en utilisant la théorie des vitesses absolues de réactions.

L'étude de la diffusion des cations compensateurs fait appel à des méthodes expérimentales et à des théories différentes selon l'état d'hydratation de l'argile. Les suspensions et les gels ont fait l'objet de nombreux travaux dont nous avons rassemblé

[1] Deuxième partie d'une Thèse de Doctorat ès Sciences physiques, soutenue à la Faculté des Sciences de Paris, le 23 février 1972.

les principaux résultats dans une étude bibliographique antérieure (CALVET, 1967). Présentement, notre travail concerne la diffusion dans les systèmes peu hydratés dont la teneur en eau n'excède pas 30 p. 100. La mesure des coefficients de diffusion doit donc être adaptée à un matériau solide qui se présente sous la forme d'une poudre. De plus, nous avons affaire à des mouvements ioniques qui ont lieu sur la surface des feuillets de l'argile. L'analyse des mécanismes correspondants nécessite donc, non seulement l'introduction des propriétés physico-chimiques de la surface, mais aussi la prise en considération des contraintes géométriques et des interactions électrostatiques liées à la proximité des feuillets qui délimitent l'espace interlamellaire.

I. — MÉTHODE DE MESURE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

A. — *Principe de la mesure*

Les coefficients de diffusion sont déterminés sur des cylindres ou des parallélipipèdes de poudre d'argile comprimée. Les détails technologiques de la méthode ont déjà été publiés (CALVET et CHAUSSIDON, 1967).

Les conditions aux limites choisies sont celles qui décrivent la diffusion dans un milieu semi-infini. Si x est la direction du flux de diffusion, C_0 la concentration dans la source, D le coefficient de diffusion, la concentration $C(x, t)$ à la distance x pour un temps t est (CRANK, 1964) :

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \, erfc \, \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (1)$$

B. — *La loi de diffusion*

1. *Conditions d'application.*

La relation précédente n'est valable que si les deux conditions suivantes sont réalisées :

— le milieu de diffusion doit être semi-infini ;
— le coefficient de diffusion D doit être constant.

Dans nos expériences, la longueur du milieu de diffusion est de $5 \cdot 10^{-1}$ cm et le produit $D \cdot t$ est toujours inférieur à 10^{-3} cm^2. Compte tenu de ces valeurs, il est possible de montrer que la première condition est vérifiée (annexe VI).

La vérification de la deuxième condition est basée sur une méthode développée par PHILLIPS (1969) : la quantité $\log [d/dx(C/C_0)]$ est une fonction linéaire de x^2 si le coefficient D est constant. L'étude statistique des représentations graphiques correspondantes permet de chiffrer la confiance que l'on peut avoir dans la constance de D (annexe VI). Les résultats montrent que la probabilité pour que D soit constant est supérieure à 0,99 dans tout le domaine d'hydratation étudié.

2. *Calcul du coefficient D.*

La mesure est effectuée en mettant en contact deux pastilles de poudre comprimée dont l'une est uniformément marquée par un traceur radioactif. Après un temps donné t, la pastille initialement non marquée est découpée en tranches de 20 μ d'épais-

seur dont la radioactivité est mesurée. Nous obtenons ainsi la distribution du traceur dans le milieu de diffusion. Cependant, le contact entre deux pastilles est nécessairement imparfait, et il n'est réalisé correctement qu'en de petites zones (fig. 23 *a*).

La distribution des ions obtenue après un temps t reflète la diffusion suivant l'axe des x, donc la diffusion dans de petits cyclindres qui ont pour base les zones de contact. Cependant, elle peut aussi représenter une diffusion hors des cylindres, perpendiculairement à l'axe des x. Cette diffusion radiale doit avoir pour effet, si elle en a un, de sous-estimer le coefficient D dans la direction x. On peut montrer que si Dt est inférieur à 10^{-3} cm², la diffusion radiale est négligeable ; ceci est confirmé par l'expérience (annexe VI).

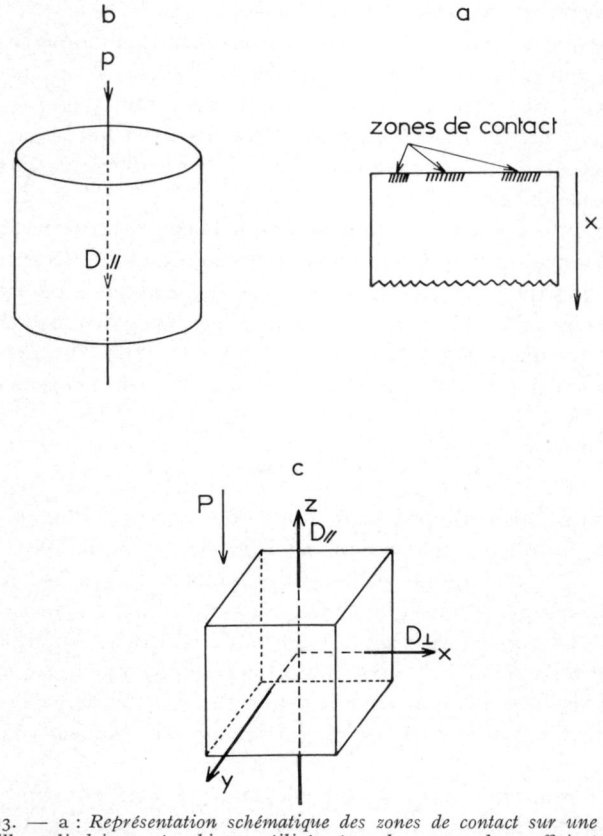


FIG. 23. — a : *Représentation schématique des zones de contact sur une pastille*
b *et* c : *pastilles cylindriques et cubiques utilisées pour la mesure des coefficients de diffusion*

Nous avons affaire à une diffusion dont le coefficient D est constant, et dont la source a une concentration effective inférieure à la vraie concentration C_0 du fait des contacts défectueux. La relation (1) contient donc deux inconnues : C_0 et D. La détermination de ces deux paramètres consiste à chercher les valeurs qui permettent d'obtenir la courbe $C = f(x)$ la plus voisine de la courbe expérimentale (annexe VI). L'erreur sur le coefficient D ainsi mesuré est de l'ordre de $\pm$ 3 p. 100.

C. — *Diffusion aux joints de grains*

A priori, il est évident que les mouvements des cations compensateurs ne seront pas rigoureusement les mêmes sur les surfaces internes et sur les surfaces externes. La diffusion globale peut alors être décrite comme la résultante d'une diffusion sur la surface interne (D_i) et d'une diffusion dans les joints de grains (surface externe des particules et des agrégats (D_e)) (Lai et Mortland, 1968). Cependant, une telle description nécessite l'application de théories assez peu utilisables dans les systèmes que nous étudions. Celles développées par Fischer, Wipple et Suzuoka (in Adda et Philibert, 1966) reposent sur la condition nécessaire que la distance de diffusion soit inférieure au diamètre moyen des grains. Ceci n'est pas réalisé dans nos expériences, ce diamètre moyen étant au plus de 50 μ, alors que la distance de diffusion est de l'ordre de 500 à 1 000 μ. Le traitement théorique qui semble le plus convenable est celui donné par Levine et Mac Callum (1960). Il est applicable à condition que les coefficients de diffusion D_i et D_e soient très différents ($D_e/D_i \simeq 10^6$), ce qui n'est certainement pas le cas ; bien que les coefficients D_e et D_i ne soient peut-être pas rigoureusement égaux, leur différence n'est pas suffisante pour permettre une distinction expérimentale.

Au sujet de cette discussion, il faut noter que la constance dans le temps du coefficient D et l'existence d'une diffusion aux joints de grains ne sont pas compatibles. Enfin, il faut remarquer que les flux observés ne peuvent pas être dûs aux seuls cations des surfaces externes, car ils seraient à peu près dix fois plus faibles (c'est le rapport entre les quantités de cations se trouvant sur les surfaces internes et externes). Les cations des surfaces internes doivent donc nécessairement participer au transport de matière.

D. — *Anisotropie de la diffusion*

Le dépôt d'une suspension d'argile donne des agrégats dont la facilité d'orientation est assez marquée (observation des raies de diffraction 001 sur des dépôts). Leur structure n'est pas connue et les seules indications que l'on ait concernent la montmorillonite sodique. Pour cette argile, la microdiffraction électronique a montré la possibilité d'existence d'associations latérales (Oberlin et Mering, 1962). Ces quelques indications très réduites conduisent cependant à penser que la compression d'une poudre d'argile peut favoriser une disposition particulière des agrégats entraînant une orientation préférentielle des particules par rapport à la direction de la pression.

La plupart des mesures ont été effectuées sur des pastilles cylindriques (fig. 23 *b*). dans la direction de l'axe du cylindre, qui est aussi la direction d'application de la pression. Pour déterminer l'importance de l'anisotropie résultant d'une orientation préférentielle, nous avons effectué des mesures de diffusion du sodium sur des pastilles parallélipipédiques (fig. 23 *c*). Ainsi, nous avons déterminé deux coefficients : l'un, $D_{//}$, suivant la direction de la pression *oz*, l'autre, $D_{\perp}$, suivant la direction perpendiculaire *ox*.

Quelles que soient la nature du cation qui sature l'argile et la teneur en eau, la relation suivante est toujours vérifiée :

$$D_{\perp} \geqslant D_{//}.$$

Les valeurs du rapport $R = D_{\perp}/D_{//}$ sont données dans le tableau 13.

TABLEAU 13

Valeurs du rapport $R = D_{\perp}/D_{//}$

Cation compensateur	Teneur en eau %	R
Na^+	7,3	2,3
	11,0	2,3
	16,0	2,0
Li^+	12,0	1,9
	17,5	1,4
K^+	6,0	1,0
	10,5	1,6
	14,4	1,6
Cs^+	5,0	1,5
	12,5	1,7
	18,0	1,7
Ca^{++}	18,4	1,0
	21,5	1,0

L'anisotropie dépend beaucoup de la nature du cation, et c'est pour le sodium qu'elle est la plus marquée. Par contre, les pastilles constituées d'argile calcique sont isotropes.

Nous avons déterminé l'énergie d'activation dans les deux directions, parallèle et perpendiculaire au sens de la pression, pour la diffusion du sodium dans l'argile sodique où l'anisotropie est la plus forte :

$E'_{//} = 5{,}6$ kcal mole^{-1} ; $E'_{\perp} = 5{,}8$ kcal mole^{-1} (teneur en eau : 11 p. 100).

Nous pouvons donc conclure que le phénomène de diffusion est de même nature dans les deux directions. La différence entre les coefficients D// et $D_{\perp}$ provient alors d'une différence de géométrie du milieu. En d'autres termes, la mesure du coefficient de diffusion n'est pas faite avec la même unité de longueur suivant les deux directions.

Il est évident que ni $D_{\perp}$, ni D//, ne représentent le vrai coefficient de diffusion D. La recherche d'une relation entre ces trois coefficients n'est pas aisée, car nous ne connaissons pas la structure des agrégats. Dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices, nous pouvons néanmoins proposer une représentation schématique. Elle conduit à la relation suivante (annexe VI) :

$$D = D_{//}(2R + 1), \qquad R = \frac{D_{\perp}}{D_{//}}.$$

Compte tenu de certaines lois de distribution des particules relativement à leur orientation, il est possible de calculer des valeurs du rapport R (annexe VI).

Il faut remarquer que la présence d'agrégats confère au milieu une structure apparemment discontinue. En fait, vis-à-vis des phénomènes de diffusion, le milieu doit être continu en raison de la continuité du film d'eau adsorbée (HOEKSTRA, 1965 ; MAMY, 1968).

II. — FORMULATION GÉNÉRALE DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

A. — *Expression du coefficient de diffusion*

L'expression générale du coefficient s'écrit :

$$D = G \cdot \delta^2 \cdot \omega \tag{2}$$

avec : ω : fréquence de saut,
δ : distance de saut,
G : facteur dépendant de la géométrie du milieu :

$$G = A \cdot K_p \tag{3}$$

A : terme qui traduit les propriétés structurales macroscopiques du milieu de diffusion (anisotropie, annexe VI),
K_p : facteur géométrique lié au réseau.

La dépendance de la fréquence de saut ω vis-à-vis de la température a fait l'objet de plusieurs théories : théorie statistique de WERT-ZENER, de EYRING, et théorie dynamique de RICE (in ADDA et PHILIBERT, 1966). Cette dernière est sans doute la moins critiquable, mais elle est d'une utilisation peu commode.

Soit un système de n particules et considérons le cas où une particule a été isolée. Dans l'approximation des petites oscillations, la fréquence de saut de cette particule est :

$$\omega = \nu \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \tag{4}$$

ν : fréquence de vibration dans la direction du saut.
ΔF : variation d'énergie libre : travail isotherme et isobare qu'effectue contre les forces d'interaction élastiques et électriques, une particule libre de vibrer dans un plan, qui se déplace réversiblement dans une direction perpendiculaire à ce plan.

(4) s'écrit :

$$\omega = \nu \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \tag{5}$$

où ΔS et ΔH sont les variations d'entropie et d'enthalpie qui accompagnent le saut.

La loi d'Arrhenius permet d'écrire :

$$D = D_0 \exp(-E/RT) \quad \text{où}$$

D_0 : facteur de fréquence. On peut admettre qu'il ne dépend pas de la température dans de petits domaines. Il s'exprime avec les mêmes unités que le coefficient D ($cm^2\ s^{-1}$).
E : énergie d'activation, exprimée en kcal $mole^{-1}$.

Par définition : $E = -R\left(\frac{d}{d(1/T)}\right)(\log D)$.

D'où, à partir de (1), (3) et (4) :

$$E = \Delta H \text{ et } D_0 = G \cdot \delta^2 \cdot \nu \cdot \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right).$$

ZENER a montré que ΔH pouvait être considéré comme l'énergie d'activation, même s'il y avait une dépendance $\Delta H = f(T)$ vis-à-vis de la température (in ADDA et PHILIBERT, 1966). A partir de (2) et (5), nous avons :

$$D = A \cdot K_p \cdot \delta^2 \cdot \nu \cdot \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \qquad (6)$$

Les fréquences de saut ω et ω' de deux isotopes de masse m et m' sont reliées par l'expression :

$$\omega' = \omega \sqrt{\frac{m}{m'}}.$$

Quand les masses m et m' sont peu différentes, les fréquences sont également peu différentes. C'est en général le cas avec les isotopes radioactifs. Cependant, quand n particules se déplacent simultanément,

$$\frac{\omega'}{\omega} < \sqrt{\frac{m}{m'}}$$

et ce rapport tend vers 1 quand n devient grand. Ceci correspond au mécanisme de diffusion par échanges cycliques.

A l'exception du facteur A déjà étudié (annexe VI), le coefficient de diffusion est défini par cinq paramètres : K_p, δ, ν, ΔS et E. L'expérience permet d'obtenir E et D_0, et tous les autres termes doivent faire l'objet d'une estimation. En utilisant les données que nous avons exposées dans le premier chapitre, nous nous proposons d'évaluer δ, ν et E. Le terme K_p dépend des caractéristiques géométriques propres du réseau comme le nombre de directions de saut équivalentes par exemple. Cependant, l'étude que nous abordons montre que plusieurs sauts sont possibles, mais que nous ne connaissons pas la loi de combinaison qui permet de passer des différentes fréquences de saut aux mesures qui ne donnent que des coefficients de diffusion apparents. Étant donné que tous les résultats obtenus concernent un seul minéral, la montmorillonite, que le terme K_p dépend essentiellement des propriétés du réseau, nous admettrons qu'il est constant quelle que soit la composition ionique de l'argile. Quant à la variation d'entropie, elle ne peut être obtenue que par différence.

B. — *Considérations générales relatives à l'énergie d'activation*

Étant directement accessible à l'expérience, l'énergie d'activation est un paramètre dont l'analyse est extrêmement intéressante et plusieurs aspects la concernant seront développés à l'occasion de la discussion des différents types de mesures de diffusion. Il nous paraît important, toutefois, d'introduire ici certaines caractéristiques générales de ce paramètre en relation avec l'énergie potentielle des cations compensateurs.

Les renseignements donnés au chapitre précédent se rapportent essentiellement à l'état hydraté 1 et, en conséquence, l'analyse des mécanismes de diffusion que nous proposons ne concerne que cet état. Nous rappelons que l'état 1 est caractérisé

par un écartement entre les feuillets de l'ordre de grandeur du diamètre de la molécule d'eau (pour l'argile Na, il lui correspond un espacement d_{001} de 12,4 Å). Cet écartement reste constant dans un domaine de teneurs en eau variable suivant la nature des cations compensateurs (voir chap. I, § I B). Les évaluations des différentes énergies d'interaction permettent de déterminer les variations d'énergie potentielle liées aux déplacements des cations. Cette détermination a tout d'abord été réalisée sur un modèle dans lequel un cation est entouré symétriquement par trois molécules d'eau (annexe IV).

Les variations d'énergie potentielle correspondant à trois types de conditions sont données dans les figures suivantes :

— figure 24 *a* : $WCA_0 = f(CP)$; la répulsion due aux cations voisins est nulle (cation isolé)
— figure 24 *b* : $WCA = f(CP)$; la répulsion est celle due à un cation voisin
— figure 24 *c* : $WCA_m = f(CP)$; le calcul tient compte d'une répulsion moyenne.

(les calculs des valeurs numériques sont donnés dans l'annexe IV)

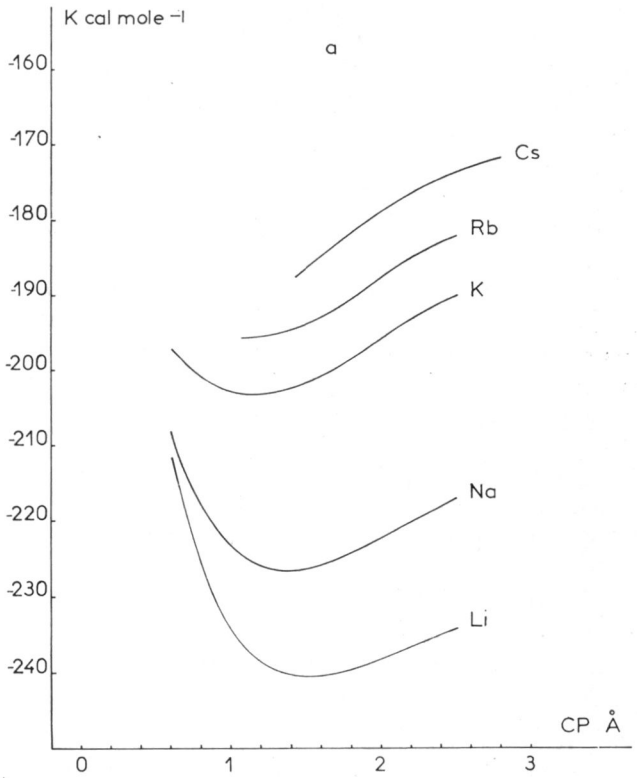
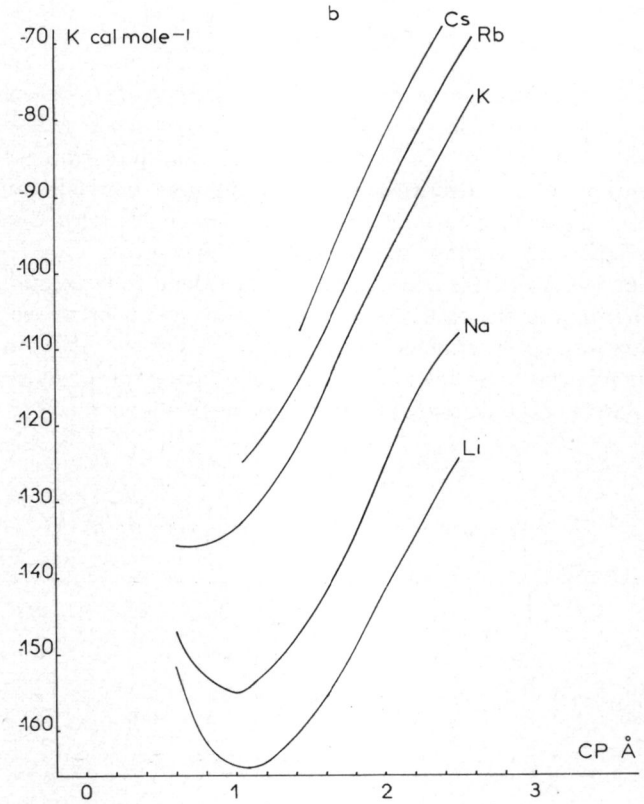


FIG. 24. *a* — *Énergie potentielle des cations hydratés*

Pour le cation compensateur, le dernier cas représente une situation moyenne et la cote du sodium correspondant à la position d'équilibre (minimum de l'énergie potentielle) est alors de 1 Å. Or, quand la montmorillonite sodique est dans un état



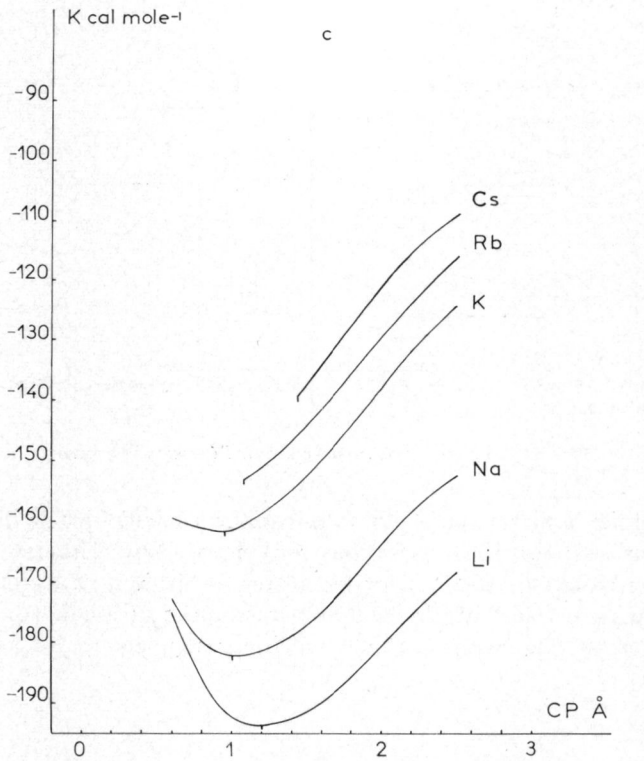


Fig. 24 *b* et *c*. — *Énergie potentielle des cations hydratés.*

hydraté où les espaces interlamellaires sont dans l'état 1 (correspondant à une valeur $d_{001} = 12{,}4$ Å), la cote du cation Na^+ déterminée expérimentalement est de 0,95 Å (1). Étant donné que dans cet état de l'argile, l'hydratation du cation est certainement voisine ou identique à celle décrite dans le modèle, nous pouvons constater que les calculs proposés tiennent compte d'une façon convenable, des différents termes énergétiques relatifs aux cations et aux molécules d'eau.

La fonction WCA_m permet donc d'estimer la valeur de la position moyenne du cation Na^+ par rapport au feuillet. Dans ces conditions, nous avons déterminé les cotes d'équilibre des autres cations (Li^+, K^+, Rb^+ et Cs^+) en utilisant les fonctions WCA_m correspondantes. Les valeurs obtenues sont rassemblées dans le tableau 14 où les cotes relatives à l'état anhydre sont également données.

TABLEAU 14

Valeurs de la cote CP des cations compensateurs

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
État anhydre	0,85 Å	0,85 Å	0,53 Å	1,07 Å	1,43 Å
État hydraté 1 ...	1,2 Å	1 Å	0,95 Å	1,07 Å	1,43 Å

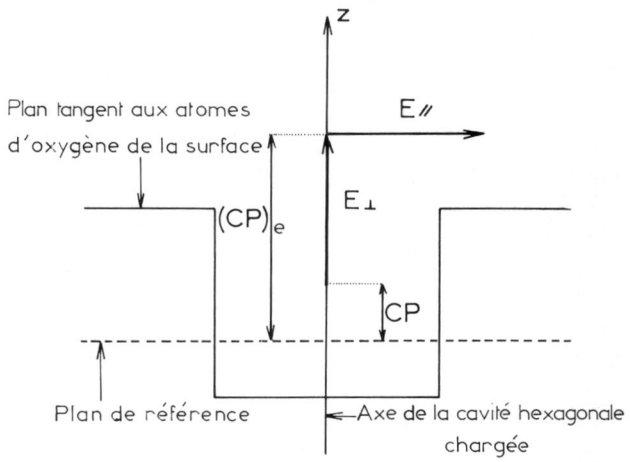


FIG. 25. — *Schéma utilisé pour définir l'énergie d'activation*

Dans une argile hydratée, la position des cations a fait l'objet de différentes descriptions. Pour les unes, tous les cations sont dans l'espace interlamellaire (MACKENZIE, 1950 ; NORRISH, 1954), pour les autres, le lithium et le sodium seraient « enfoncés » dans le réseau contrairement au potassium et au césium (BARSHAD, 1952). Cette étude permet d'apporter quelques précisions supplémentaires et les résultats

(1) PEZERAT et MERING, 1967.

que nous avons obtenus montrent que lors de l'hydratation, seuls les cations Li^+ et K^+ s'éloignent du feuillet. Ceci est en accord avec les observations de PEZERAT et MERING (1967) pour le Na^+, de CHAUSSIDON (1963) pour K^+, et les conclusions de MERING et BRINDLEY (1967) pour Cs^+.

La cote CP du centre du cation par rapport au plan de référence est telle cependant, qu'aucun mouvement de translation n'est possible. Par suite de l'agitation thermique, le cation effectue des oscillations de fréquence ν dans la direction z. Il faut que leur amplitude soit suffisamment grande pour que le cation atteigne une cote $(CP)_e$ qui lui permette de subir une translation si son énergie est suffisante. Nous appellerons cette cote critique, la cote d'échappement. L'énergie d'activation E peut être décomposée en deux parties : l'une correspondant aux mouvements suivant z : $E_\perp$; l'autre correspondant à la translation : $E_{//}$ (fig. 25). L'évaluation des termes $E_\perp$ et $E_{//}$ repose sur les données précédemment développées et en particulier, sur le modèle qui a permis d'établir les fonctions WCA_0 et WCA. Étant donné cependant, que ce modèle ne représente qu'une situation, nous introduirons des perturbations pour étudier l'influence du nombre de molécules d'eau, de leur position, de leur orientation, et des modifications de leurs propriétés liées à la présence de cations voisins.

III. — AUTODIFFUSION DES CATIONS COMPENSATEURS

Coefficient d'autodiffusion = diffusion d'un cation M^+ dans une argile monoionique saturée par M^+. Il est noté : D_M^M. Il lui correspond l'énergie d'activation E_M^M.

A. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ces résultats ont déjà fait l'objet de publications antérieures (CALVET et CHAUSSIDON, 1967 ; CALVET, 1969 ; CALVET et CHAUSSIDON, 1969). Ils sont rassemblés dans le tableau 15.

TABLEAU 15

Coefficients d'autodiffusion et énergies d'activation correspondantes

Teneur en eau (%)	Coefficients d'autodiffusion à 20°C ($cm^2\ s^{-1}$)				Énergie d'activation (kcal $mole^{-1}$)			
	D_{Na}^{Na}	D_{Rb}^{Rb}	D_{Cs}^{Cs}	D_{Ca}^{Ca}	E_{Na}^{Na}	E_{Rb}^{Rb}	E_{Cs}^{Cs}	E_{Ca}^{Ca}
5	$9{,}2 \cdot 10^{-9}$	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$			8,7	13,9		
7,5	$2{,}2 \cdot 10^{-8}$	$1{,}0 \cdot 10^{-8}$			7,1	11,0		
10	$5{,}25 \cdot 10^{-8}$	$3{,}3 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-12}$		6,0	7,9		
12,5	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	$7{,}25 \cdot 10^{-8}$			5,2	6,7		
15	$2{,}62 \cdot 10^{-7}$	$1{,}41 \cdot 10^{-7}$	$7{,}5 \cdot 10^{-11}$	$1{,}95 \cdot 10^{-9}$	4,4	5,0	30,0	17,5
17,5	$5{,}35 \cdot 10^{-7}$	$2{,}62 \cdot 10^{-7}$		$2{,}0 \cdot 10^{-8}$	4,1			17,5
20				$4{,}9 \cdot 10^{-8}$				11,5
22,5				$7{,}9 \cdot 10^{-8}$				8,3

1. — *Valeurs des coefficients* D_M^M

Le classement observé est le suivant : $D_{Na}^{Na} > D_{Rb}^{Rb} > D_{Cs}^{Cs}$. Il apparaît que la diffusion dans une argile hydratée est très différente de la diffusion en solution où le classement inverse est observé (Mc CALL et DOUGLAS, 1965). En solution, en effet, les cations effectuent un grand nombre de sauts tout en restant solvatés (GONTSHAROV *et al.*, 1967), et le diamètre de l'ion hydraté devient alors un facteur limitant. Au contraire, sur la surface de l'argile, ce sont les dimensions cristallographiques qui déterminent les différents types d'interactions, et donc les caractéristiques des mouvements ioniques.

Il est également intéressant de noter que le coefficient d'autodiffusion du sodium, pour une teneur en eau de 17,5 p. 100 (ce qui correspond à l'état d'hydratation 2 pour un assez grand nombre d'espaces interlamellaires), est de $2 \cdot 10^{-7}$ à — 15° C. Dans une suspension d'argile à — 15° C, il est de $1{,}7 \cdot 10^{-7}$ (MURRMANN *et al.*, 1968). La similitude de ces deux résultats montre que l'argile d'une suspension gelée a des espaces interlamellaires très semblables à ceux d'une argile peu hydratée, en accord avec les travaux d'ANDERSON (1966).

Le graphique 26 *a* donne la variation du rapport $D_{Na}^{Na} / D_{Rb}^{Rb}$ en fonction de la teneur en eau. Il faut observer que la valeur de ce rapport passe par un minimum à une teneur en eau correspondant à l'apparition de l'état 2 pour l'argile sodique.

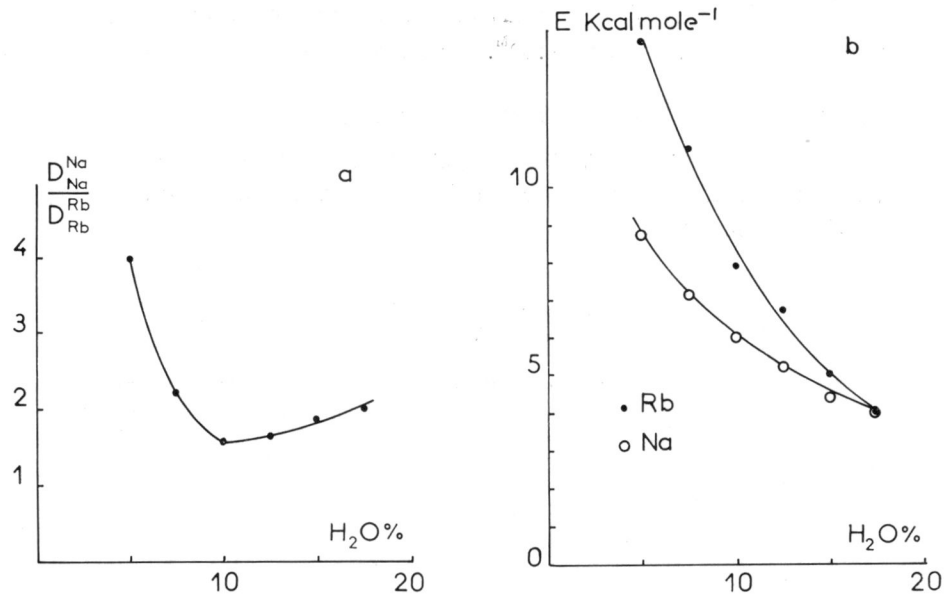


FIG. 26. — a : *Variation du rapport* D_{Na}^{Na}/D_{Rb}^{Rb} *en fonction de la teneur en eau*
b : *Variation de l'énergie d'activation en fonction de la teneur en eau. Autodiffusion du sodium et du rubidium*

Représentés en fonction de l'inverse de la température, les logarithmes des coefficients de diffusion donnent une droite qui permet la détermination des valeurs de l'énergie d'activation et du facteur de fréquence D_0.

2. — *Valeurs de l'énergie d'activation* E_M^M

Les valeurs obtenues conduisent au classement suivant :

$$E_{Na}^{Na} < E_{Rb}^{Rb} < E_{Cs}^{Cs} \quad \text{et} \quad E_{Na}^{Na} < E_{Ca}^{Ca}$$

Des observations analogues ont également été notées par SHAINBERG et KEMPER (1966 *a*).

Les variations de E en fonction de la teneur en eau montrent que (graph. 26 *b*) :

— E diminue quand la teneur en eau augmente.

— La variation de E est continue. Ceci suggère que pour l'argile saturée par Rb^+, le remplissage des espaces interfeuillets n'est complet que pour des teneurs en eau assez élevées. Pour l'argile sodique, cette continuité est conforme au passage graduel de l'état 1 à l'état 2.

— (ΔE_{Na}^{Na} / Δ quantité d'eau) est inférieur à (ΔE_{Rb}^{Rb} / Δ quantité d'eau).

Le graphique 4 indique qu'à partir de 5 p. 100, le taux de feuillets écartés de l'argile Rb est constant. L'examen du passage de l'état anhydre à l'état 1 a montré que l'écartement des feuillets saturés par Rb^+ était possible quand le nombre de molécules d'eau par cation était de deux (chap. 1, § I A). Étant donné qu'un cation est hydraté en moyenne par 2,68 molécules d'eau (chap. 1, § III B), l'hydratation du rubidium se fait donc approximativement en deux étapes.

Pour l'argile sodique, les cations Na^+ ont toujours leur hydratation maximum. Ainsi, une augmentation de la teneur en eau modifie plus l'hydratation du cation pour Rb^+, et affecte plus le remplissage des espaces autour du cation pour le sodium, d'où l'origine possible d'une variation plus importante de E_{Rb}^{Rb}.

Enfin, dans le cas de l'autodiffusion du calcium, la grande variation de l'énergie d'activation (voir tabl. 15) en fonction de la teneur en eau est certainement reliée à la grande affinité du calcium pour l'eau.

3. — *Facteur de fréquence* D_0

Ses valeurs pour Na^+ et Rb^+ sont données dans le tableau 16.

TABLEAU 16

Valeurs du facteur de fréquence D_0 *pour l'autodiffusion*

Teneur en eau (%)	Na^+ ($cm^2\ s^{-1}$)	Rb^+ ($cm^2\ s^{-1}$)
5	$2{,}88 \cdot 10^{-2}$	$5{,}5 \cdot 10^{+1}$
7,5	$4{,}76 \cdot 10^{-3}$	$1{,}62 \cdot 10^{+1}$
10	$1{,}57 \cdot 10^{-3}$	$2{,}6 \cdot 10^{-2}$
12,5	$9{,}1 \cdot 10^{-4}$	$7{,}3 \cdot 10^{-3}$
15	$5{,}1 \cdot 10^{-4}$	$7{,}6 \cdot 10^{-4}$

D'après la relation (5), l'expression de D_0 s'écrit :

$$D_0 = A \cdot K_p \cdot \delta^2 \cdot \nu \cdot \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right)$$

$K_p \simeq 1$ étant une approximation, l'évaluation des paramètres A, δ et ν nous permettra de calculer la variation d'entropie ΔS. Ce calcul sera examiné dans le prochain paragraphe.

B. — Étude des paramètres de l'autodiffusion

1. — *Distance de saut*

La distribution des cavités hexagonales chargées sur une surface ou sur deux surfaces voisines détermine les valeurs des distances de saut. Nous utilisons toujours le même modèle pour décrire la superposition des feuillets (voir chap. 1, § II A).

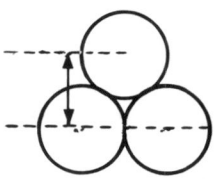
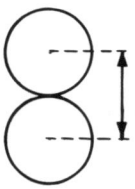
a) *Les sauts possibles dans l'espace interlamellaire.*

Les surfaces qui limitent l'espace interlamellaire sont désignées par FI et FS. Considérons le déplacement d'un cation qui se trouve sur la surface FI.

α) *Il n'y a pas de cavité chargée voisine sur la surface FS : sauts S_i, distance de saut δ_i .*

TABLEAU 17

Valeurs de la cote d'échappement

	Passage au col	Passage au sommet
$(CP)_e$		
	$(CP)_e$ =	$(CP)_e$ =
Li^+	1,61 Å	2,06 Å
Na^+	1,82	2,24
K^+	2,27	2,61
Rb^+	2,45	2,77
Cs^+	2,63	2,93

Soit un cation situé en C (fig. 27) et une cavité hexagonale chargée et libre en H(I). Pour effectuer le trajet C → H(I), deux chemins extrêmes peuvent être décrits.

— Chemin C.P_s·H(I). (passage au sommet). La cote d'échappement doit per

mettre au cation de passer sur le sommet de l'atome d'oxygène (tabl. 17). Le point P_s se trouve au centre d'un groupe P, et il est sur un axe situé à 1,47 Å de l'axe de la cavité hexagonale voisine située sur la surface FS.

— Chemin $C \cdot P_c \cdot H(I)$ (passage au col). La cote d'échappement doit permettre au cation d'être tangent à deux atomes d'oxygène (tabl. 17). Le point P_c se trouve au centre d'une cavité T sur la surface FI.

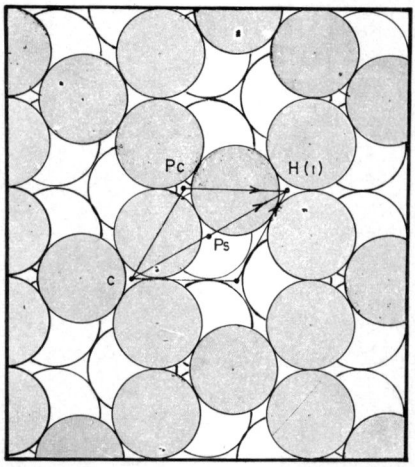


FIG. 27. — *Trajectoires possibles entre deux cavités hexagonales chargées situées sur la surface FI.* Les cercles gris représentent les atomes d'oxygène de la surface FS.

La distance de saut δ_i est d_1 dans les deux cas, bien que la distance parcourue réellement soit plus grande pour le chemin $C \cdot P_c \cdot H(I)$. Les sauts dans les cavités chargées plus éloignées mettent en jeu une succession de trajets élémentaires du type $C \cdot P_s \cdot H(I)$ ou $C \cdot P_c \cdot H(I)$.

β) *Il y a une cavité chargée voisine sur la surface FS : saut S_s, distance de saut δ_s.*

Si cette cavité chargée sur la surface FS est libre, le cation situé sur la surface FI peut aller l'occuper. Dans ces conditions, le cation passe par un point P_c (fig. 27) et il s'agit d'un passage au col. La distance de saut mesurée parallèlement à la surface est égale à la distance qui sépare les axes des cavités hexagonales voisines (l'une sur la surface FI, l'autre sur la surface FS), soit $\delta_s = 2{,}94$ Å.

b) *Définition d'une distance moyenne de saut.*

A priori, le phénomène de diffusion peut être décrit de deux façons en admettant :

— qu'il existe deux mécanismes indépendants, l'un pour les sauts S_i, l'autre pour les sauts S_s ;

— qu'il existe un mécanisme mettant en jeu les deux types de sauts.

Il n'est évidemment pas possible de choisir étant donné que la diffusion observée est le résultat global d'une certaine combinaison des deux types de saut.

Sur la surface SI, les distances de saut possibles sont égales aux distances qui séparent une cavité chargée de la cavité chargée la plus proche. Soient δ_{ij} ces dis-

tances, dont les probabilités p_i sont données dans le tableau 4. L'indice i se rapporte à la surface FI, l'indice j se rapporte aux différentes distances de saut sur cette surface. Aux distances δ_s et δ_{ij} correspondent les fréquences ω_s et ω_{ij}.

P et P′ étant respectivement les probabilités d'avoir les distances de saut δ_{ij} et δ_s, un coefficient de diffusion moyen $\overline{D}$ peut être défini :

$$\overline{D} = P\overline{D_i} + P'D_s$$

$\overline{D_i}$: coefficient de diffusion moyen sur la surface FI seule.
D_s : coefficient de diffusion correspondant aux seuls sauts S_s.

On a : $\overline{D} = P \sum_j p_j \cdot \omega_{ij} \cdot \delta_{ij}^2 + P' \cdot \omega_s \cdot \delta_s^2$.

Soit l'hypothèse simplificatrice suivante : les fréquences de saut sont inversement proportionnelles aux distances de saut.

$$\omega_{ij} = \omega_{i_1} \frac{\delta_{i_1}}{\delta_{ij}} \qquad \text{et} \qquad \omega_s = \omega_{i_1} \frac{\delta_{i_1}}{\delta_s}.$$

Dans ces conditions, $\overline{D}$ s'écrit :

$$\overline{D} = \omega_{i_1} \cdot \delta_{i_1} \left(P \sum_j p_j \cdot \delta_{ij} + P' \delta_s \right).$$

D'où la distance moyenne de saut :

$$\overline{\delta} = \left[\delta_{i_1} \left(P \sum_j p_j \delta_{ij} + P' \cdot \delta_s \right) \right]^{1/2}$$

Nous avons mesuré le coefficient de diffusion sur une argile dont la capacité d'échange a été réduite à 73,5 méq./100 g d'argile calcinée à 1 000° C, par chauffage d'une montmorillonite biionique (Na-Li) (CALVET et PROST, 1971). La probabilité d'avoir une cavité hexagonale chargée est dans ce cas $p = 0{,}127$.

Les résultats sont regroupés dans le tableau 18.

TABLEAU 18

Comparaison entre une argile normale et une argile traitée

	Argile normale	Argile traitée
Probabilité élémentaire p ...	0,20	0,127
1. Teneur en eau 9,3 % :		
• Coefficient d'autodiffusion de Na^+	$4{,}16 \cdot 10^{-8}$	$2{,}75 \cdot 10^{-8}$
• Énergie d'activation	6,6 kcal mole^{-1}	6,9-7,1 kcal mole^{-1}
2. Teneur en eau 14,8 % :		
• Coefficient d'autodiffusion	$2{,}40 \cdot 10^{-7}$	$2{,}06 \cdot 10^{-7}$
Distance moyenne d ..... (annexe VII)	4,96 Å	5,57 Å

Soient D_0 et D_0' les facteurs de fréquence pour l'argile normale et pour l'argile traitée :

$$\frac{D_0}{D_0'} = \frac{A}{A'} \cdot \frac{\delta^2}{\delta'^2} \cdot \frac{\nu}{\nu'} \cdot \frac{\exp(\Delta S/R)}{\exp(\Delta S'/R)}$$

Étant donné que le cation diffusant est le même dans les deux argiles, et que la teneur en eau est suffisamment élevée pour permettre une hydratation complète des cations, on peut écrire :

$$\nu \simeq \nu' \qquad \text{et} \qquad \Delta S \simeq \Delta S'.$$

En admettant que la différence de capacité d'échange entre l'argile traitée et l'argile normale n'entraîne pas une différence d'anisotropie, le rapport des facteurs de fréquence devient :

$$\frac{D_0}{D_0'} = \frac{\delta^2}{\delta'^2}$$

Les valeurs expérimentales conduisent à : $0{,}8 < \dfrac{\delta}{\delta'} < 0{,}95$.

Le rapport des distances moyennes est : $\dfrac{\overline{\delta}}{\overline{\delta'}} = 0{,}89$ (annexe VII).

Étant donné les approximations utilisées et la difficulté des mesures, nous pouvons considérer que l'accord est satisfaisant. Il en résulte que la loi de distribution des distances de saut et la loi de proportionnalité des fréquences décrivent assez bien la réalité. Cependant, la comparaison avec l'expérience ne porte que sur le rapport δ/δ'. Celui-ci ne dépend pas de la façon dont la formule (6) est écrite. Nous aurions obtenu la même valeur en mettant $\omega_s \cdot \delta_s$ en facteur. En conséquence, il n'est pas possible de relier directement l'énergie d'activation mesurée à l'une ou l'autre des fréquences ω_s ou ω_{i1}.

2. — *Fréquence de vibration*

a) *Principe du calcul de la fréquence.*

Quand la fonction d'énergie potentielle du cation est connue, la fréquence de vibration ν peut être calculée. Pour cela, nous admettrons qu'au voisinage de la position d'équilibre, l'énergie potentielle est donnée par une fonction de Morse :

$$U = A[1 - \exp(-\eta x)]^2 \qquad (7)$$

A : énergie nécessaire pour éloigner le cation à l'infini,
η : terme caractérisant la vitesse de variation de U,
x : écart par rapport à la position d'équilibre (la position d'équilibre est repérée par la cote CP).

La fréquence de vibration de l'oscillateur dont la fonction d'énergie potentielle est U, a pour expression (LANDAU et LIFCHITZ, 1966) :

$$\nu = \frac{\eta}{\pi}\sqrt{\frac{A}{2m}} - \frac{\eta^2 h}{4\pi^2 \cdot m}$$

m : masse du vibrateur,
h : constante de Planck.

Nous avons déterminé des fonctions d'énergie potentielle pour un certain nombre de cas (fonctions WCA_0, WCA, WCA_m du paragraphe II A). L'approximation de ces courbes par une fonction de Morse est aisée pour les cations Li^+, Na^+ et K^+, mais elle est problématique pour Rb^+ et Cs^+, car elles ne possèdent pas de minimum absolu, du fait que nous nous sommes placé dans l'approximation de sphères rigides.

Comme nous n'avons pas d'autres renseignements, nous admettrons que l'ajustement est possible pour la partie connue de ces courbes.

Les courbes d'énergie potentielle que nous possédons sont en nombre limité. Il nous sera cependant nécessaire de connaître les variations de la fréquence dues à des modifications de la teneur en eau, ou à des changements d'état d'hydratation des cations. Il nous faut donc un moyen de prévoir au moins le sens de cette variation. Cette prévision ne peut pas être basée sur le seul examen de l'énergie A, car le terme η a un poids beaucoup plus important. Du fait de la complexité du système étudié, un calcul de perturbation est difficile, aussi avons-nous adopté une méthode plus empirique. Elle consiste à déterminer la fonction $U = f(x)$ (ici x = CP — (CP) équilibre) en présence d'une perturbation et à calculer la fréquence ν_p. Une comparaison des perturbations, d'une part, des fréquences d'autre part, nous donnera des indications utiles pour prévoir les modifications des propriétés du système (ici la fréquence de vibration du cation).

b) *Étude de quelques exemples.*

Les résultats donnés dans le tableau 19 concernent le sodium. La première fonction est WFI (énergie du cation situé sur la surface FI dans le champ du réseau FI). D'autres fonctions sont obtenues en ajoutant différentes perturbations.

TABLEAU 19

Différentes fonctions d'énergie potentielle utilisées pour calculer la fréquence de vibration du cation Na^+

Perturbations	Fonctions potentielles	A kcal mole^{-1}	α 10^8 cm	ν 10^{13} s^{-1}
Réseau FS	WFI	128,5	0,365	0,397
	WFI + WFS	145,3	0,320	0,370
3 H_2O près du cation (orientation dipolaire)	WFI + WFS + WH	226,6	0,260	0,375
3 H_2O près du cation (orientation constante)	WFI + WFS + WH′	222,4	0,320	0,458
3 H_2O près du cation (1 H_2O est éloigné)	WFI + WFS + WH′	195,6	0,260	0,349
1 cation voisin sur FS	WFI + WFS + WH + Wrep	155,0	0,580	0,692

c) *Fréquences de vibration des cations monovalents et prévision de leurs variations.*

Le tableau 20 donne les fréquences correspondant aux fonctions (WFI + WFS + WH) et (WFI + WFS + WH + Wrep).

TABLEAU 20

Fréquences de vibration des cations monovalents

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
Pas de cation sur FS	$0{,}732 \cdot 10^{13}\ s^{-1}$	0,375	0,314	0,163	0,133
1 cation sur FS	1,122	0,692	0,437	0,559	0,400

Les fréquences de vibration se classent suivant l'ordre :

$$\nu Li > \nu Na > \nu K > \nu Rb > \nu Cs.$$

A partir de l'étude précédente, certaines règles peuvent être proposées pour prévoir les variations de la fréquence :

— le voisinage de deux surfaces (rôle de WFS) entraîne une diminution de ν par rapport à une surface seule ;

— la présence d'un cation voisin sur FS augmente ν par rapport au cation isolé ;

— les liaisons hydrogène doivent entraîner une augmentation de ν par rapport au cas où le cation est normalement hydraté (voir WH') ;

— la présence d'un cation qui éloigne et oriente les molécules d'eau est à l'origine d'une diminution de ν (influence de WH'').

3. — *Énergie d'activation*

Quand nous avons introduit la fréquence de saut, nous n'avons considéré qu'une seule particule en mouvement. En fait, toutes les particules du système participent à la diffusion et une description complète devrait tenir compte de toutes les molécules d'eau et de tous les cations qui se trouvent dans l'espace interlamellaire. Cela est impossible et nous devons faire certaines hypothèses simplificatrices. Comme pour l'étude de la fréquence de vibration, nous n'examinerons pas le deuxième état d'hydratation.

a) *Évaluation de* $E_\perp$.

$E_\perp$ est l'énergie qu'il faut fournir à un cation pour qu'il atteigne la cote d'échappement. Elle s'évalue simplement à partir des courbes d'énergie potentielle $U = f(CP)$. Si E_0 est l'énergie du minimum, E_0' l'énergie correspondant à la cote désirée, on a :

$$E_\perp = E_0' - E_0.$$

Les fonctions U sont les fonctions WCA et WCA_0 données au paragraphe II A. WCA correspond au cas où il y a un cation voisin sur la surface FS.

Exemple : Li^+ avec un cation sur la surface FS, passage au col :

$E_0 = -164{,}3$ kcal mole^{-1} ; $E_0'(CP = 1{,}61\ Å) = -155{,}6$ kcal mole^{-1} ;

$$E_\perp = +9{,}3 \text{ kcal mole}^{-1}.$$

Le tableau 21 donne $E_\perp$ pour les différents cas qui nous intéressent.

Les fonctions utilisées sont les suivantes :

— Pas de cation sur la surface FS : WCA_0 figure 24 *a*.

— Un cation sur la surface FS : WCA figure 24 *b*.

TABLEAU 21

Valeurs de l'énergie $E_\perp$ *correspondant à différentes situations*

	Passage au col			Passage au sommet
	Pas de cation sur FS	1 cation sur FS présent	Cavité sur FS chargée et libre	Pas de cation sur FS
Li^+	$\simeq 0$	9,3	$\simeq 0$	2,4
Na^+	2,6	21,0	0,8	6,5
K^+	10,8	47,8	7,9	13,7
Rb^+	13,2	51,2	10,1	15,6
Cs^+	14,6	46,7	12,1	16,0

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

— Une cavité chargée et libre sur la surface FS : WCA_0 + WOHS. WOHS est l'énergie d'interaction entre un cation et la charge négative résultant d'une substitution isomorphique dans le feuillet FS (voir l'annexe VII).

Il faut remarquer que la présence d'un cation voisin sur la surface FS est à l'origine d'une grande barrière de potentiel. Dans ces conditions, le mouvement du cation n'est possible que si ce cation voisin quitte sa position. Autrement dit, il faut qu'il y ait un déplacement simultané du cation situé sur la surface FI et du cation situé sur la surface FS. Il en résulte que seuls des mécanismes par échanges cycliques sont possibles. De tels mécanismes avec des barrières de potentiel peu élevées ont été décrits pour les métaux (ZENER, 1950).

Quand le cation n'est pas hydraté dans un espace interlamellaire dont l'écartement est celui de l'état 1, $E_\perp$ a une valeur plus élevée (tabl. 22).

TABLEAU 22

Énergies $E_\perp$ *en l'absence d'eau*
Pas de cation sur FS

	Passage au col	Passage au sommet
Li^+	3,3	8,5
Na^+	5,7	11,2
K^+	11,8	15
Rb^+	13,9	15,7
Cs^+	15,1	16,1

Les énergies sont en kcal $mole^{-1}$.

La comparaison entre les valeurs obtenues à partir de la courbe U = WFI + WFS (fig. A 24, annexe VII) et les valeurs des colonnes 1 et 4 du tableau 21 montre que la diminution du nombre de molécules d'eau adsorbées entraîne une augmentation de l'énergie d'activation.

b) *Évaluation de* $E_{//}$.

α) *Rôle de l'eau.*

L'énergie $E_{//}$ sera faible si, au cours du déplacement, le cation peut conserver l'hydratation qu'il possède quand il occupe une position d'équilibre. L'importance de la contribution ΔE_e de l'eau à $E_{//}$ dépend du nombre et de la mobilité des molécules d'eau. ΔE_e doit donc diminuer au fur et à mesure que le nombre de molécules d'eau de remplissage augmente dans l'espace interlamellaire. Lors de l'étude des propriétés de l'eau adsorbée, nous avons constaté que les molécules étaient très mobiles. Nous supposerons par conséquent, que pour l'autodiffusion, leurs mouvements ne limitent pas ceux des cations, soit $\Delta E_e = 0$.

β) *Rôle du réseau.*

Le réseau contribue donc seul à l'énergie $E_{//}$ pour l'autodiffusion, et en partie pour l'hétérodiffusion.

$E_{//}$ est évaluée pour quatre chemins de diffusion (fig. 28).

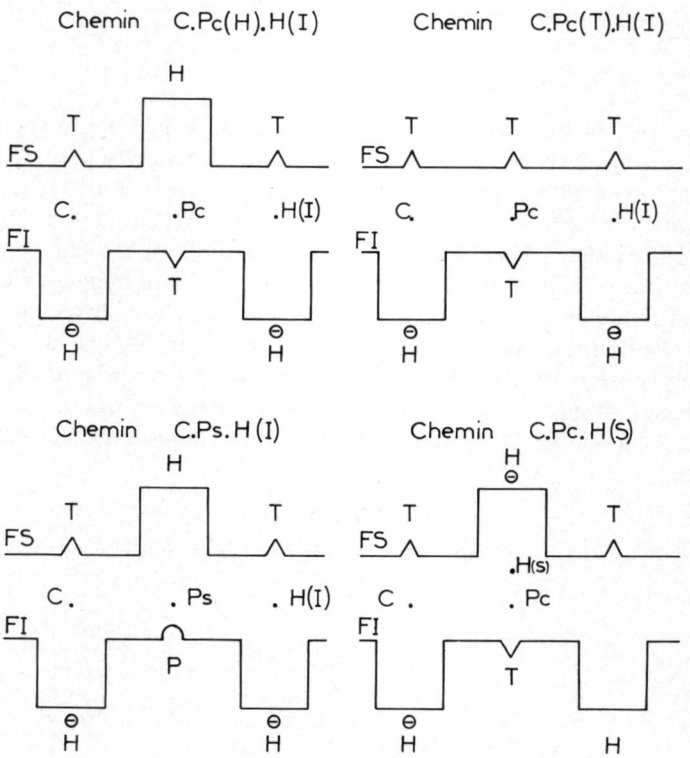


FIG. 28. — *Différents chemins possibles pour calculer* $E_{//}$

— Saut S_i : chemins $C \cdot P_c(H) \cdot H(I)$, $C \cdot P_c(T) \cdot H(I)$
chemin $C \cdot P_s \cdot H(I)$.

— Saut S_s : chemin $C \cdot P_c \cdot H(S)$.

Les notations $P_c(H)$ et $P_c(T)$ signifient que le cation étant sur l'axe d'une cavité T

sur la surface FI, se trouve aussi sur l'axe d'une cavité H, ou d'une cavité T sur la surface FS (voir fig. 27).

Le calcul du terme $E_{//}$ est donné dans l'annexe VII.

Le tableau 23 donne les valeurs de $E_{//}$ pour tous les cations.

TABLEAU 23

Valeurs de l'énergie E// pour différents chemins de diffusion

	C·P$_c$(H)·H(I)	C·P$_c$(T)·H(I)	C·P$_s$·H(I)	C·P$_c$·H(S)
Li^+	7,2	19,0	4,4	7,5
Na^+	6,4	18,5	7,5	6,3
K^+	7,1	19,4	12,6	2,6
Rb^+	7,7	19,6	15,0	1,3
Cs^+	8,1	19,7	15,9	0,6

Les énergies sont calculées en kcal mole^{-1}.

c) *Conclusion du paragraphe 3.*

Nous avons vu que pour un cation sur la surface FI, la présence d'un cation voisin sur la surface FS était à l'origine d'une grande barrière de potentiel. Les cations ne peuvent donc se déplacer que par le jeu d'un mécanisme d'échanges cycliques. Les évaluations précédentes ne concernent pas un tel mécanisme puisque nous avons rapporté la variation d'énergie du système à la variation d'énergie d'un cation, étant donné que le nombre de cations qui se déplacent simultanément n'est pas connu. Il faut aussi rappeler que les énergies que nous proposons sont déduites de modèles et qu'elles résultent de différences entre des termes dont les valeurs sont élevées et voisines. En conséquence, les évaluations ne peuvent être qu'approchées.

Le tableau 23 montre que le chemin C·P(T).H(I) n'est pas favorable. La variation totale d'énergie $E_T + E_{//}$ correspondant aux autres chemins est donnée dans le tableau 24.

TABLEAU 24

Énergies d'activation calculées

	Mouvements sur la surface FI		Mouvement de la surface FI vers la surface FS
	Chemin C.P$_c$(H)·H(I)	Chemin C.P$_s$·H(I)	Chemin C.P$_c$·H(S)
Li^+	7,4	6,8	7,5
Na^+	9,0	14,0	7,1
K^+	17,9	26,3	10,5
Rb^+	20,9	30,6	11,4
Cs^+	22,7	31,9	12,7

Sauf pour Li^+, le chemin passant par le sommet est certainement peu probable. Pour les chemins passant par le col, les énergies d'activation se classent dans l'ordre suivant dans le cas de l'autodiffusion :

$$E_{Li^+} < E_{Na^+} < E_{K^+} < E_{Rb^+} < E_{Cs^+}.$$

Ce classement se retrouve fréquemment au sujet des propriétés des cations alcalins. Cependant, il faut souligner que la relation entre E et le rayon ionique n'est pas particulièrement directe et simple.

La diminution du nombre de molécules d'eau entraîne une augmentation de l'énergie d'activation par $E_\perp$ et ΔE_e. Il en résulte que la teneur en eau de l'argile conditionne en partie l'énergie d'activation de la diffusion. Soulignons que $E_\perp$ est surtout influencée par l'eau d'hydratation des cations, alors que ΔE_e l'est surtout par l'eau de remplissage (elle assure l'hydratation du cation au cours de ses déplacements).

Ces conclusions sont tout à fait conformes aux résultats expérimentaux.

4. — *Les variations d'entropie d'activation*

La variation d'entropie d'activation est donnée par la formule suivante :

$$\Delta S = \frac{1}{R} \operatorname{Log} \left[\frac{D_0}{A \cdot K_p \cdot \delta^2 \cdot \nu} \right].$$

En utilisant les valeurs de R précédemment données (tabl. 13), les valeurs de A sont les suivantes (tabl. 25).

TABLEAU 25

Corrections dues à l'anisotropie

Teneur en eau %	A^{Na}_{Na}	A^{Rb}_{Na}	$A^{Na}_{Na} / A^{Rb}_{Na}$
$\simeq$ 5	5,6	3,4	1,65
$\simeq$ 10	5,6	4,2	1,33
$\simeq$ 16	5	4,2	1,2

Pour estimer A^{Rb}_{Rb}, nous avons utilisé les valeurs trouvées pour la diffusion de Na^+ dans des argiles saturées par K^+ et Cs^+. Nous avons ensuite posé que $A^{Rb}_{Rb} \simeq A^{Rb}_{Na}$, étant donné que le cation diffusant ne doit pas modifier l'anisotropie du milieu de diffusion.

On a : $\nu^{Na}_{Na} = 3{,}75 \cdot 10^{12}$ et $\nu^{Rb}_{Rb} = 1{,}63 \cdot 10^{12}$. Compte tenu de l'étude que nous avons faite, nous pouvons admettre que ces valeurs varient peu quand la teneur en eau augmente.

Enfin, étant donné que la diffusion a lieu dans le même minéral, les distances de saut pour Na^+ et Rb^+ sont les mêmes : $\delta_{Na} = \delta_{Rb}$.

Dans ces conditions, les facteurs de fréquence dépendent du terme ΔS et ont pour expression :

$$(D_0)^{Na}_{Na} = 4{,}70 \cdot 10^{-2} \exp (\Delta S^{Na}_{Na}/R)$$

$$(D_0)^{Rb}_{Rb} = 1{,}63 \cdot 10^{-2} \exp (\Delta S^{Rb}_{Rb}/R)$$

$$(K_p \simeq 1 ; \quad A^{Na}_{Na} \simeq 5 ; \quad A^{Rb}_{Rb} \simeq 4 ; \quad \delta = 5{,}10^{-8} \text{ cm}).$$

Utilisant les valeurs données dans le tableau 16, il est possible de relier la variation du signe de ΔS à la teneur en eau des argiles. La figure 29 représente cette relation.

Les limites entre les domaines sont évidemment approximatives. Étant donné le grand nombre de feuillets écartés dans l'argile saturée par Rb^+, il faut que la teneur en eau soit élevée pour que le remplissage des surfaces internes devienne important. Pour l'argile saturée par Na^+, au contraire, ce remplissage commence à de faibles teneurs ($\simeq$ 6 p. 100). Dans une argile sodique dont la teneur en eau est inférieure à 6 p. 100, et dans une argile Rb dont la teneur est inférieure à 11 p. 100, les cations se déplacent donc dans un milieu où les molécules d'eau de remplissage sont peu nombreuses et provoquent une diminution locale de l'ordre du milieu. Quand le nombre de molécules d'eau augmente, le cation peut s'hydrater convenablement pendant ses déplacements en provoquant un réarrangement des molécules, d'où une augmentation de l'ordre.

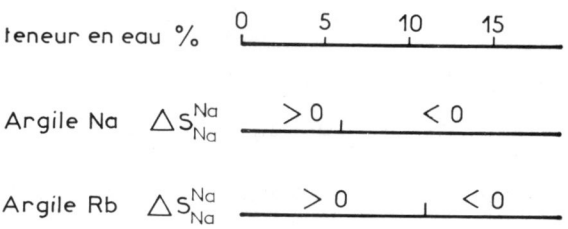


FIG. 29. — *Influence de la teneur en eau sur le signe de la variation d'entropie*

C. — CONCLUSION DU PARAGRAPHE III

L'étude de l'autodiffusion montre que la mobilité des cations augmente dans l'ordre : $Cs^+ < Rb^+ < Na^+$ et $Ca^{++} < Na^+$.

Deux groupes de paramètres définissent le coefficient de diffusion :

Paramètres géométriques :

- A = terme qui exprime l'anisotropie du milieu de diffusion ;
- K_p = facteur dépendant des caractéristiques géométriques du réseau ;
- δ = distance de saut.

Paramètres énergétiques :

- ν = fréquence de vibration du cation au voisinage de la position d'équilibre ;
- E = énergie d'activation ;
- ΔS = variation d'entropie.

Parmi ces paramètres, trois ont surtout retenu notre attention.

La distance de saut est déterminée par la distribution des cavités hexagonales chargées. Pour la montmorillonite étudiée, sa valeur moyenne est 5 Å.

Les interactions entre le cation d'une part, le réseau et les molécules d'eau d'autre part, fixent les valeurs de la fréquence de vibration et de l'énergie d'activation. Ces deux paramètres dépendent étroitement de la composition ionique et de l'hydratation de l'argile. Les fréquences trouvées sont toujours de l'ordre de grandeur de la

fréquence de Debye pour les solides, soit 10^{13}–10^{12} s^{-1}. L'énergie d'activation est constituée de deux termes, l'un correspondant à un mouvement perpendiculaire à la surface du feuillet, l'autre à un mouvement parallèle à la surface. Sa valeur dépend beaucoup de l'hydratation de l'argile et elle diminue quand la teneur en eau augmente. Son étude révèle que le mécanisme réel de la diffusion doit être un mécanisme d'échange cyclique.

Enfin, il faut noter que l'analyse des valeurs et des variations de l'énergie d'activation conduit à des conclusions en accord avec les résultats expérimentaux, en particulier pour :

— les valeurs numériques de l'énergie d'activation ;
— le rôle des cations compensateurs ;
— l'influence des quantités d'eau fixées sur l'argile.

Ces constatations montrent donc que les approximations et les modèles utilisés d'une part et que les mécanismes proposés d'autre part représentent convenablement le phénomène d'autodiffusion dans la montmorillonite.

IV. — HÉTÉRODIFFUSION DES CATIONS COMPENSATEURS

La définition des mesures d'hétérodiffusion dépend de la composition ionique de l'argile. Considérons la diffusion d'un cation C_1 dans une argile saturée ou pouvant être saturée par des cations C_1 et C_2. Nous pouvons alors définir les trois types de mesures indiquées dans le tableau 26.

TABLEAU 26

Définition des mesures d'hétérodiffusion

Proportion de cations C_2 Pc_2	0	↗	1
Probabilité d'avoir C_2 voisin de C_1	0	↗	1
Nature du phénomène de diffusion	Autodiffusion	Hétérodiffusion à dilution finie	Hétérodiffusion à dilution infinie
Énergie d'activation	$E^{C_1}_{C_1}$	$E^{(C_1\text{-}C_2)}_{C_1}$	$E^{C_2}_{C_1}$

Les paramètres physiques déterminant les mouvements des cations C_1 sont modifiés par rapport à l'autodiffusion du fait de la présence des cations C_2. Nous examinerons ces modifications à l'occasion de l'interprétation des résultats de l'hétérodiffusion à dilution infinie.

A. — Hétérodiffusion a dilution infinie

Ces mesures concernent la diffusion du sodium et du rubidium dans des argiles saturées par les cations Li^+, K^+, Rb^+, Cs^+ et Ca^{++}.

1. — *Résultats expérimentaux relatifs à la diffusion du sodium*

La figure 30 représente la variation de log (D^M_{Na}) en fonction de la teneur en eau et le tableau 27 donne les énergies d'activation correspondantes.

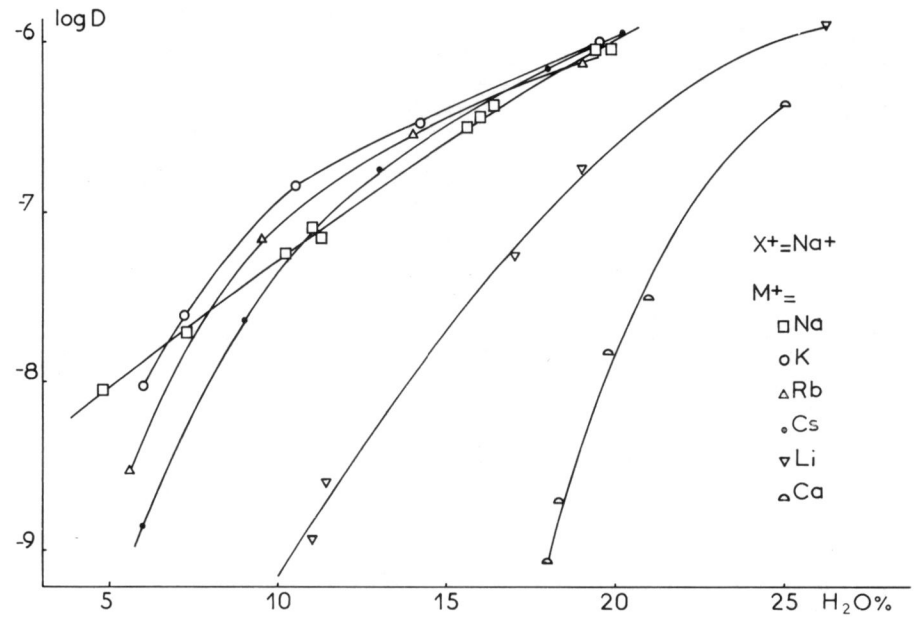


Fig. 30. — *Variation du logarithme du coefficient d'hétérodiffusion du sodium* D^{Na}_{Na} *en fonction de la teneur en eau et de la composition ionique de l'argile*

Quelle que soit la teneur en eau, on a toujours :

$$D^{Na}_{Na} > D^{Li}_{Na} > D^{Ca}_{Na}.$$

Avec K^+, Rb^+ et Cs^+, plusieurs classements sont observés suivant l'hydratation de l'argile :

$$\text{Teneur en eau} < Q_1 : D^{Cs}_{Na} < D^{Rb}_{Na} < D^{K}_{Na} < D^{Na}_{Na} ; \quad 6 < Q_1 < 8\ \%$$
$$Q_1 < \text{Teneur en eau} < Q_2 : D^{Cs}_{Na} < D^{Rb}_{Na} < D^{Na}_{Na} < D^{K}_{Na} ; \quad 8\ \% < Q_2 < 10\ \%$$
$$Q_2 < \text{Teneur en eau} < Q_3 : D^{Cs}_{Na} < D^{Na}_{Na} < D^{Rb}_{Na} < D^{K}_{Na} ; \quad 10\ \% < Q_3 < 13\ \%$$
$$Q_3 < \text{Teneur en eau} : D^{Na}_{Na} < D^{Cs}_{Na} < D^{Rb}_{Na} < D^{K}_{Na}.$$

Les limites de Q_1, Q_2 et Q_3 correspondent aux limites obtenues pour $D_{//}$ et $D_{\perp}$. Si le cation M^+ a une plus grande affinité pour l'eau que le sodium, le classement

des énergies d'activation E^{M}_{Na} ne dépend pas de la teneur en eau. Il est variable dans le cas contraire :

à toutes les teneurs en eau : $E^{Ca}_{Na} > E^{Li}_{Na} > E^{Na}_{Na}$
teneur en eau de 6 p. 100 : $E^{Cs}_{Na} > E^{Na}_{Na}$
teneur en eau de 10 p. 100 : $E^{Na}_{Na} = E^{K}_{Na} > E^{Rb}_{Na} > E^{Cs}_{Na}$
teneur en eau de 18 p. 100 : $E^{K}_{Na} > E^{Rb}_{Na} > E^{Cs}_{Na} > E^{Na}_{Na}$.

Pour des teneurs en eau supérieures à 10 p. 100, les énergies d'activation E^{K}_{Na}, E^{Rb}_{Na} et E^{Ca}_{Na} sont constantes.

TABLEAU 27

Énergies d'activation correspondant à l'hétérodiffusion du sodium

Cation M	Teneur en eau (%)			
	6	10	18	25
Li^+		11	4,2	
K^+		6	6	
Rb^+		4,7	4,7	
Cs^+	12	4,3	4,3	
Ca^{++}			9,2	5,5

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

2. — *Interprétation*

a) *Modifications des paramètres de la diffusion liées à l'hétérodiffusion.*

α) *Énergie d'activation.*

La fonction d'énergie potentielle d'un cation est modifiée quand il y a à proximité un autre cation qui attire et oriente une molécule d'eau. Le calcul du terme $E_\perp$ pour le déplacement du cation sodium conduit aux valeurs données dans le tableau 28.

TABLEAU 28

Influence de la proximité d'un cation Li^+ sur l'énergie $E_\perp$ relative à la diffusion de Na^+

	Cation Na^+ seul	Un cation Li^+ est voisin du cation Na^+
Passage au col	2,6 kcal $mole^{-1}$	3,8 kcal $mole^{-1}$
Passage au sommet	6,5 kcal $mole^{-1}$	8,6 kcal $mole^{-1}$

Ces valeurs correspondent au cas où il n'y a pas de cations voisins sur la surface FS.

Si un cation Na^+ est entouré de plusieurs cations Li^+, l'augmentation de $E^{\perp}$ est encore plus grande. Pour son importance dans l'étude de l'hétérodiffusion, cette observation doit être développée. Nous avons décrit le passage d'une molécule d'eau d'un état d'énergie à un autre (chap. 1, § IV A). Quand deux cations sont voisins, la probabilité que la molécule d'eau a d'être près de l'un ou de l'autre, dépend de l'énergie d'interaction cation-eau. Soient deux cations C_1 et C_2 dont les énergies d'interaction avec une molécule d'eau sont E_1 et E_2 (E_1 et $E_2 < 0$). La probabilité pour que la molécule se trouve près du cation C_1 est :

$$p_1 = [1 + \exp(-\Delta E/RT)]^{-1} \qquad \text{avec} \qquad \Delta E = E_2 - E_1$$

$|E_2| \ll |E_1|$: p_1 tend vers 1. C_1 est hydraté par trois molécules d'eau. Ce cas est aussi celui où le cation C_1 est isolé (pas de cation C_2 voisin).

$|E_2| \gg |E_1|$: p_1 tend vers 0. Il n'y a que deux molécules près de C_1. 1 molécule est toujours près de C_2.

Le cas étudié précédemment montre que la présence d'un cation $C_2(Li^+)$ à forte énergie d'hydratation à proximité du cation $C_1(Na^+)$ qui se déplace, entraîne pour celui-ci une augmentation de $E_{\perp}$. Il est donc possible de prévoir que $E_{\perp}$ d'un cation C_1 sera d'autant plus élevée que l'énergie d'hydratation de C_2 sera grande. Dans ces conditions l'inégalité suivante peut être proposée :

$$E_{\perp}(|E_2| < |E_1|) < E_{\perp}(|E_2| = |E_1|) < E_{\perp}(|E_2| > |E_1|).$$

De plus, il est prévisible que la contribution ΔE_e de l'eau au terme $E_{//}$ sera d'autant plus grande que l'affinité pour l'eau du cation C_2 est élevée par rapport à celle du cation C_1. Pour ΔE_e, il est donc également possible d'envisager une inégalité semblable à la précédente.

TABLEAU 29

Effet d'un cation C_2 sur l'énergie d'activation de la diffusion d'un cation C_1

C_1	C_2				
	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
Li^+	0	—	— —	— — —	— — — —
Na^+	+	0	—	— —	— — —
K^+	+ +	+	0	—	— —
Rb^+	+ + +	+ +	+	0	—
Cs^+	+ + + +	+ + +	+ +	+	0

+ : augmentation ; — : diminution.

Nous pouvons alors prévoir le sens de variation de l'énergie d'activation pour le déplacement d'un cation C_1 voisin d'un cation C_2 (tabl. 29 où la référence correspond au cas $C_1 = C_2$).

Exemples : 1) $C_1 = Na^+$ $C_2 = Cs^+$ donc $|E_1| > |E_2|$
et $E_{Na}^{Cs} < E_{Na}^{Na}$

2) $C_1 = Na^+$ $C_2 = Li^+$ donc $|E_1| < |E_2|$
et $E_{Na}^{Li} > E_{Na}^{Na}$.

Le nombre de molécules d'eau pouvant hydrater un cation détermine donc très largement l'énergie d'activation correspondant à ses déplacements. Les variations de ce nombre de molécules peuvent avoir deux origines :

— soit une quantité d'eau adsorbée insuffisante pour permettre une hydratation complète du cation (3 molécules pour 1 cation isolé par exemple) ;

— soit la présence de cations à énergie d'hydratation élevée.

Dans ces conditions, deux règles générales peuvent être proposées pour l'hétérodiffusion. Soit un cation C dont on étudie la diffusion dans deux argiles A et B, saturées, l'une par des cations A, l'autre par des cations B.

Règle 1. $E_C^A > E_C^B$ si le nombre de molécules d'eau disponibles dans l'argile A pour hydrater le cation C est inférieur au nombre de molécules disponibles dans l'argile B. Ceci se produit en particulier quand les deux argiles ont la même teneur en eau et des taux de feuillets écartés différents.

Règle 2. Le nombre de molécules d'eau étant suffisant pour hydrater le cation C dans les deux argiles, $E_C^A < E_C^B$, si l'énergie d'hydratation du cation B est plus forte que celle du cation A. Cet effet de compétition sera d'autant plus important que la différence entre l'affinité du cation C pour l'eau et l'affinité des cations A et B sera grande.

Ces deux règles reposent donc sur le rôle essentiel joué par les interactions cation-eau. Cependant, elles ne sont valables que si les écartements des feuillets dans l'argile A et dans l'argile B sont les mêmes, c'est-à-dire si les argiles sont dans des états comparables. Ainsi, ces deux règles ne permettront-elles de comparer que des argiles qui se trouvent soit dans l'état 1, soit dans l'état 2. Si, par exemple, l'argile A est dans l'état 1 et l'argile B dans l'état 2, ces règles ne sont plus applicables.

β) *Fréquence de vibration du cation.*

Nous avons montré que la présence d'un cation qui oriente et éloigne les molécules d'eau voisines d'un cation donné, entraînait une diminution de la fréquence de vibration de ce cation. Ainsi, la proximité d'un cation Li^+ est à l'origine d'une diminution de la fréquence de vibration d'un cation Na^+ (voir § II B rôle de WH'').

Un raisonnement analogue à celui développé pour l'énergie d'activation montre que l'effet des différents cations C_2 sur ν de C_1 sera une augmentation de la fréquence si $|E_2| < |E_1|$, une diminution si $|E_2| > |E_1|$ (par rapport à la fréquence correspondant à $E_1 = E_2$). Le tableau 30 résume ces effets et donne la fréquence de C_1 modifiée par C_2.

TABLEAU 30

Effet d'un cation C_2 sur la fréquence de vibration d'un cation C_1

C_1	C_2				
	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
Li^+	0	+	+ +	+ + +	+ + + +
Na^+	—	0	+	+ +	+ + +
K^+	— —	—	0	+	+ +
Rb^+	— — —	— —	—	0	+
Cs^+	— — — —	— — —	— —	—	0

+ : augmentation de ν ; — : diminution de ν.

b) *Interprétation des valeurs observées de l'énergie d'activation.*

Le graphique 4 permet de trouver les teneurs en eau Q pour lesquelles le nombre de feuillets écartés des argiles Li, K, Rb et Cs est identique ou voisin de celui de l'argile sodique. Pour les hydratations inférieures à Q, dans les argiles Li, K, Rb et Cs, le nombre de molécules d'eau disponibles pour hydrater le sodium est plus faible que dans l'argile Na. C'est donc le domaine d'application de la première des règles que nous avons précédemment définies. Quand la teneur en eau est supérieure à Q, la deuxième règle s'applique, à condition, toutefois, que les argiles comparées présentent des écartements interfeuillets comparables.

α) *Argile lithique et argile calcique.*

Les deux règles conduisent à $E_{Na}^{Li} > E_{Na}^{Na}$. Quand la teneur en eau est supérieure à 10 p. 100, l'état 2 commence à apparaître à la fois pour l'argile Li et pour l'argile Na. L'étude de cet état (chap. 1, § III B) a montré que les cations Li^+ et Na^+ étaient dans des situations identiques quant à leur hydratation. C'est donc essentiellement la compétition pour l'eau qui doit déterminer le classement $E_{Na}^{Li} > E_{Na}^{Na}$. Lorsque la teneur en eau augmente, cet effet de compétition s'atténue et la différence entre E_{Na}^{Li} et E_{Na}^{Na} diminue.

Les mesures des coefficients de diffusion D_{Na}^{Ca} ont été effectuées dans les argiles calciques fortement hydratées (18 — 30 p. 100 d'eau) pour lesquelles tous les feuillets ont un écartement correspondant à l'état 2 (voir graphique 3). Le nombre de molécules d'eau est donc suffisant pour que les cations Na^+ soient hydratés et pour que la deuxième règle puisse s'appliquer. Dans ces conditions, on a : $E_{Na}^{Ca} > E_{Na}^{Na}$.

Pour la diffusion du sodium dans l'argile lithique et dans l'argile calcique, le classement des énergies d'activation est en accord avec celui des coefficients de diffusion.

β) *Argiles saturées par K^+, Rb^+ et Cs^+.*

Comparons tout d'abord la diffusion du sodium dans l'argile sodique et dans l'argile césique. Tant que la teneur en eau est inférieure à 12 p. 100, la première règle s'applique et nous avons : $E_{Na}^{Cs} > E_{Na}^{Na}$, conformément à l'expérience. Quand la teneur en eau devient supérieure à 12 p. 100, l'argile sodique évolue vers l'état 2, et ne peut être comparée à l'argile césique que pour des hydratations peu éloignées de cette valeur. Dans ces conditions, le nombre de feuillets dont l'écartement correspond à l'état 1 reste assez grand et l'application de la deuxième règle donne $E_{Na}^{Cs} < E_{Na}^{Na}$.

Pour les argiles saturées par K^+ et Rb^+, les mêmes arguments sont valables. La première règle s'applique pour des teneurs en eau inférieures à Q. Quand les teneurs sont supérieures à Q, la deuxième règle peut être utilisée avec les mêmes restrictions que pour Cs^+.

Le classement de D_{Na}^{Na} et de D_{Na}^{M} ($M = K^+, Rb^+, Cs^+$) peut s'expliquer par le classement de E_{Na}^{Na} et E_{Na}^{M}. On peut alors établir le schéma donné dans la figure 31.

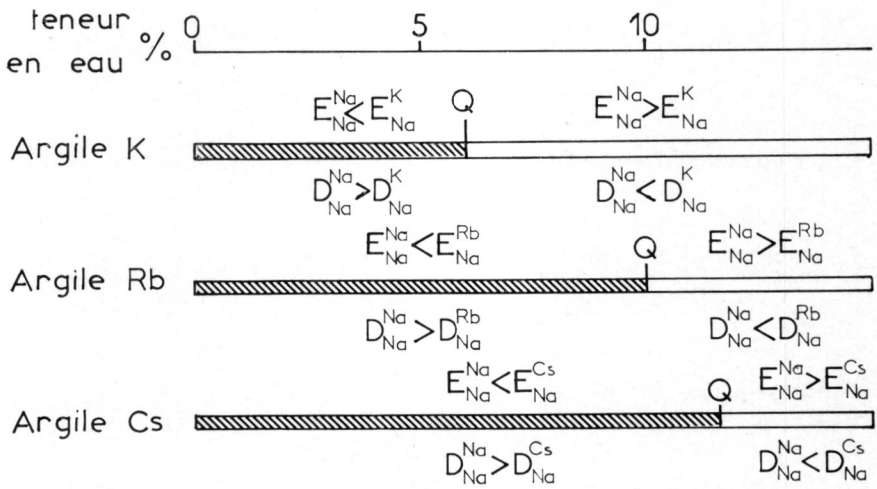


FIG. 31. — *Classements des coefficients de diffusion et des énergies d'activation pour la diffusion de Na^+ dans des argiles saturées par K^+, Rb^+ et Cs^+*

Effectuons maintenant la comparaison entre les seules argiles saturées par K^+, Rb^+ et Cs^+. Le classement des coefficients de diffusion : $D_{Na}^{Cs} < D_{Na}^{Rb} < D_{Na}^{K}$ s'explique directement pour les faibles teneurs en eau (inférieures à 6 p. 100). En effet, le taux de feuillets écartés augmente dans l'ordre $K^+ < Rb^+ < Cs^+$, et l'hydratation des cations Na^+ diminue dans l'ordre $K^+ > Rb^+ > Cs^+$. La première règle doit donc établir le classement des énergies : $E_{Na}^{Cs} > E_{Na}^{Rb} > E_{Na}^{K}$, en accord avec le classement des coefficients de diffusion.

Quand la teneur en eau est supérieure à 10 p. 100 environ, le classement observé est $E_{Na}^{Cs} < E_{Na}^{Rb} < E_{Na}^{K}$, conformément à la deuxième règle. Cependant, les coefficients de diffusion se classent dans un ordre différent : $D_{Na}^{K} > D_{Na}^{Rb} > D_{Na}^{Cs}$. Dans

ce cas, la seule considération de l'énergie d'activation n'est plus suffisante pour expliquer les observations. Il faut alors étudier le facteur de fréquence D_0.

Enfin, quand l'argile est saturée par des cations dont l'affinité pour l'eau est plus faible que celle du sodium, l'énergie d'activation, pour les mouvements de Na^+, doit être peu affectée par des variations de teneur en eau si le nombre de molécules d'eau est suffisant, car la compétition entre les cations se fait à l'avantage du sodium. Ainsi, au-dessus de 10 p. 100 d'eau, les énergies E_{Na}^{M} ($M = K^+, Rb^+, Cs^+$) sont constantes, alors que E_{Na}^{Li} varie beaucoup : 11 kcal $mole^{-1}$ à 10 p. 100, 4,2 kcal $mole^{-1}$ à 18 p. 100.

c) *Étude du facteur de fréquence.*

D'après le paragraphe II B, le facteur de fréquence a pour expression :

$$D_0 = A \cdot K_p \cdot \delta^2 \cdot \nu \cdot \exp\left(\frac{\Delta S}{R}\right)$$

Comparons l'argile Na et l'argile Rb (10 p. 100 d'eau) :

$$\frac{(D_0)_{Na}^{Na}}{(D_0)_{Na}^{Rb}} = \frac{A_{Na}^{Na}}{A_{Na}^{Rb}} \cdot \frac{(K_p)_{Na}^{Na}}{(K_p)_{Na}^{Rb}} \cdot \frac{[\delta_{Na}^{Na}]^2}{[\delta_{Na}^{Rb}]^2} \cdot \frac{\nu_{Na}^{Na}}{\nu_{Na}^{Rb}} \cdot \frac{\exp\left(\frac{\Delta S_{Na}^{Na}}{R}\right)}{\exp\left(\frac{\Delta S_{Na}^{Rb}}{R}\right)} \simeq 20$$

Étant donné qu'il s'agit de la même argile, on a :

$$(K_p)_{Na}^{Na} = (K_p)_{Na}^{Rb} \qquad \text{et} \qquad \delta_{Na}^{Na} = \delta_{Na}^{Rb}$$

Les tableaux 24 et 29 donnent :

$$\frac{\nu_{Na}^{Na}}{\nu_{Na}^{Rb}} < 1 \qquad \text{et} \qquad \frac{A_{Na}^{Na}}{A_{Na}^{Rb}} = 1{,}33$$

En conséquence, il faut avoir :

$$\frac{\exp\left(\Delta S_{Na}^{Na} / R\right)}{\exp\left(\Delta S_{Na}^{Rb} / R\right)} > 1$$

Nous avons vu que :

$$\Delta S_{Na}^{Na} < 0, \qquad \text{d'où} \qquad \Delta S_{Na}^{Rb} < 0 \qquad \text{avec} \qquad |\Delta S_{Na}^{Na}| < |\Delta S_{Na}^{Rb}|$$

En comparant de la même façon $(D_0)_{Na}^{Cs}$ et $(D_0)_{Na}^{Na}$, $(D_0)_{Na}^{K}$ et $(D_0)_{Na}^{Na}$, $(D_0)_{Na}^{Rb}$ et $(D_0)_{Na}^{K}$, on trouve que :

$$\Delta S_{Na}^{K} < 0, \ \Delta S_{Na}^{Cs} < 0 \qquad \text{avec} \qquad |\Delta S_{Na}^{K}| < |\Delta S_{Na}^{Rb}| < |\Delta S_{Na}^{Cs}|$$

Une comparaison analogue entre $(D_0)_{Na}^{Na}$ et $(D_0)_{Na}^{Li}$ conduit à deux possibilités :

$$\Delta S_{Na}^{Li} < 0 \qquad \text{avec} \qquad |\Delta S_{Na}^{Li}| < |\Delta S_{Na}^{Na}|$$

ou

$$\Delta S_{Na}^{Li} > 0$$

Quand le sodium se déplace dans une argile saturée par le cation M^+, il provoque un réarrangement des molécules d'eau sur son passage, d'où une variation d'entropie.

Celle-ci peut être comparée à la variation d'entropie en solution résultant du remplacement du cation M^+ par le sodium.

En utilisant les valeurs des entropies absolues données par LATIMER *et al.* (1939), on trouve :

$$M^+ = Li^+ \quad \Delta S^{Li}_{Na} = + \ 9 \text{ cal mole}^{-1} \text{ degré}^{-1}$$
$$M^+ = K^+ \quad \Delta S^{K}_{Na} = - \ 11 \text{ cal mole}^{-1} \text{ degré}^{-1}$$
$$M^+ = Rb^+ \quad \Delta S^{Rb}_{Na} = - \ 15 \text{ cal mole}^{-1} \text{ degré}^{-1}$$
$$M^+ = Cs^+ \quad \Delta S^{Cs}_{Na} = - \ 18 \text{ cal mole}^{-1} \text{ degré}^{-1}$$

Ces résultats montrent que sur les argiles, les variations d'entropie sont très certainement liées à l'eau adsorbée. De plus on peut conclure que ces variations sont positives pour le déplacement de Na^+ dans l'argile lithique.

En résumé, la variation d'entropie accompagnant la diffusion du sodium dans une argile saturée par M^+ est :

— positive avec $M^+ = Li^+$, $\Delta S^{Li}_{Na} > 0$

— négative avec $M^+ = K^+, Rb^+, Cs^+$, $\Delta S^{M}_{Na} < 0$

$$\text{et } |\Delta S^{K}_{Na}| < |\Delta S^{Rb}_{Na}| < |\Delta S^{Cs}_{Na}|$$

Ces classements sont plausibles, étant donné que le déplacement de Na^+ ne peut entraîner une augmentation de l'ordre que si l'affinité des cations M^+ est plus faible que l'affinité du sodium pour l'eau.

3. — *Hétérodiffusion du rubidium*

Les résultats sont représentés par la figure 32.

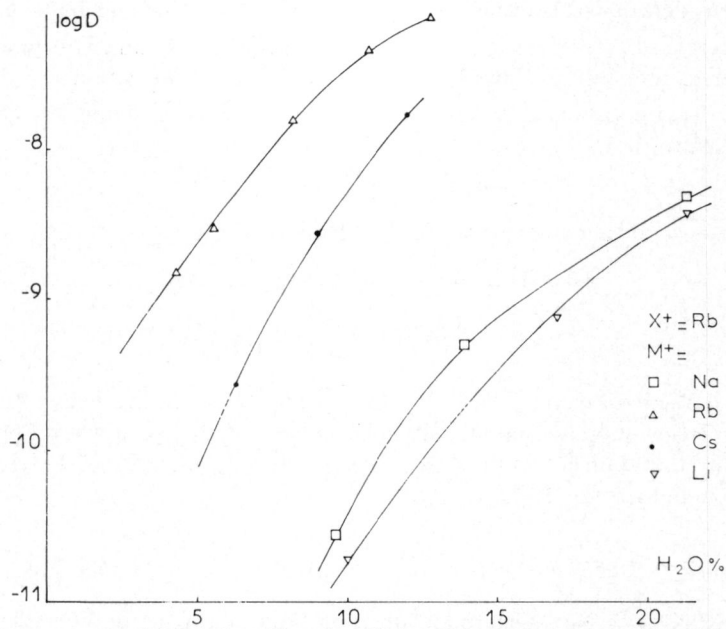


FIG. 32. — *Variation du logarithme du coefficient d'hétérodiffusion du rubidium* D^{M}_{Rb} *en fonction de la teneur en eau et de la composition ionique de l'argile*

Pour tous les états d'hydratation $D^{Rb}_{Rb} > D^{Na}_{Rb} > D^{Li}_{Rb}$ et $D^{Cs}_{Rb} > D^{Na}_{Rb} > D^{Li}_{Rb}$.

Ces deux classements peuvent s'expliquer par la deuxième règle, bien que le nombre de molécules d'eau disponibles pour hydrater Rb^+ dans les argiles sodiques et lithiques soit plus grand que dans les argiles Rb et Cs. Ceci est dû à la grande différence d'énergie d'interaction entre l'eau et Rb^+, comparée à celle qui correspond à Li^+ et Na^+.

Le classement $D^{Rb}_{Rb} > D^{Cs}_{Rb}$ est justifié aux faibles teneurs en eau, pour lesquelles on peut prévoir : $E^{Rb}_{Rb} < E^{Cs}_{Rb}$ en vertu de la première règle.

Pour les teneurs en eau élevées, l'application de la deuxième règle :

$$E^{Rb}_{Rb} > E^{Cs}_{Rb} \quad \text{conduit à} \quad \Delta S^{Cs}_{Rb} < 0 \quad \text{avec} \quad |\Delta S^{Cs}_{Rb}| > |\Delta S^{Rb}_{Rb}|$$

Cette observation et les conclusions précédentes forment ainsi un ensemble de résultats cohérents.

B. — Hétérodiffusion a dilution finie

En nous reportant au tableau 29, nous pouvons prévoir le sens de la variation de l'énergie d'activation pour la diffusion d'un cation C_1, $E^{(C_1\text{-}C_2)}_{C_1}$, quand la proportion de cation C_2 varie :

— augmentation quand $E^{C_1}_{C_1} < E^{C_2}_{C_1}$ si l'énergie d'hydratation du cation C_2 est supérieure à l'énergie d'hydratation du cation C_1;

— diminution quand $E^{C_1}_{C_1} > E^{C_2}_{C_1}$ si l'énergie d'hydratation du cation C_2 est inférieure à l'énergie d'hydratation du cation C_1.

Ces considérations résultent de l'application de la deuxième règle. Par conséquent, l'énergie d'activation $E^{(C_1\text{-}C_2)}_{C_1}$ de l'hétérodiffusion à dilution finie est une fonction de la probabilité d'avoir un cation C_2, voisin d'un cation C_1, donc de la proportion P_{C_2} de cations C_2. Nous ferons alors l'hypothèse que $E'^{(C_1\text{-}C_2)}_{C_1}$ est une fonction linéaire de P_{C_2} :

$$E'^{(C_1\text{-}C_2)}_{C_1} = E^{C_1}_{C_1} + P_{C_2} \cdot E' \tag{8}$$

Dans ces conditions, le coefficient de diffusion s'écrit :

$$D = D_0 \exp\left[-(E^{C_1}_{C_1} + P_{C_2} \cdot E') / RT\right]$$

et

$$\text{Log } D = \text{Log } D_0 - \frac{E^{C_1}_{C_1}}{RT} - \frac{E'}{RT} \cdot P_{C_2}. \tag{9}$$

Si l'hypothèse est exacte, log D doit être une fonction linéaire de P_{C_2}. Remarquons que cette relation suppose que D_0 soit indépendant de P_{C_2}, ce qui est approximatif évidemment (toutefois la forme de la relation n'est pas modifiée si le terme ΔS est une fonction linéaire de P_{C_2}).

1. — *Diffusion de Rb^+ dans les argiles biioniques* (Na-Rb)

$C_1 = Rb^+$, $C_2 = Na^+$. Quand la teneur en sodium augmente, l'énergie d'activation doit augmenter, et le coefficient doit donc diminuer. C'est ce qui est observé.

On a : $$P_{C_2} = \frac{\text{nombre de cations } Na^+}{\text{nombre total de cations}} ; P_{C_1} = P_{Rb} = 1 - P_{C_2}$$

La figure 33 représente log D (Rb) $= f(P_{Rb})$. La relation est vérifiée pour les teneurs en rubidium supérieures à 30 p. 100. Quand la proportion de sodium devient importante, il se peut que le terme E′ change de valeur, ou que la relation linéaire (8) ne soit plus applicable.

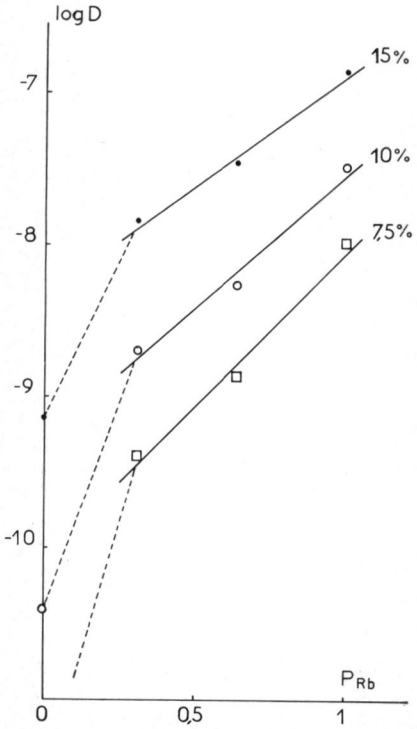


FIG. 33. — *Variation du logarithme du coefficient de diffusion du rubidium dans une argile biionique* (Na-Rb) *en fonction de la proportion de rubidium pour différentes teneurs en eau*

2. — *Diffusion dans les argiles biioniques* (Na-Ca)

Les résultats expérimentaux sont donnés dans les figures 34 et 35.

a) *Diffusion du sodium* $C_1 = Na^+ ; C_2 = Ca^{++}$.

Deux effets conditionnent la diffusion :

— un effet de compétition pour l'eau (deuxième règle). Cet effet, qui est une augmentation de l'énergie d'activation, dépend de la proportion de calcium et son importance doit diminuer quand la teneur en eau augmente. Il existe à toutes les teneurs en eau.

— un effet de changement de phase : quand la proportion de calcium devient supérieure à 33 p. 100 de la capacité d'échange, l'espace apparent *d*001 augmente et passe de 12,4 Å à 15,5 Å (GLAESER, 1953). Cette variation est assez brutale :

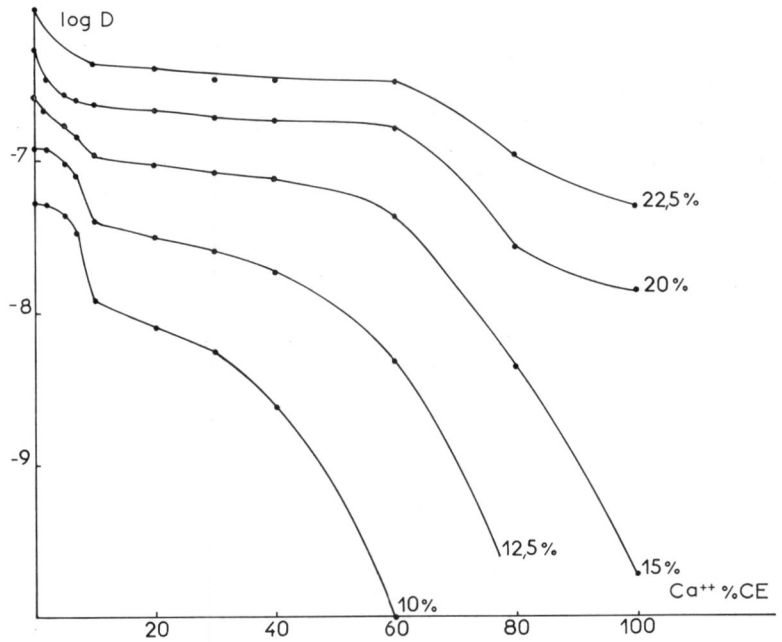


FIG. 34. — *Variation du logarithme du coefficient de diffusion du sodium dans une argile biionique* (Na-Ca) *en fonction de la saturation en calcium pour différentes teneurs en eau*

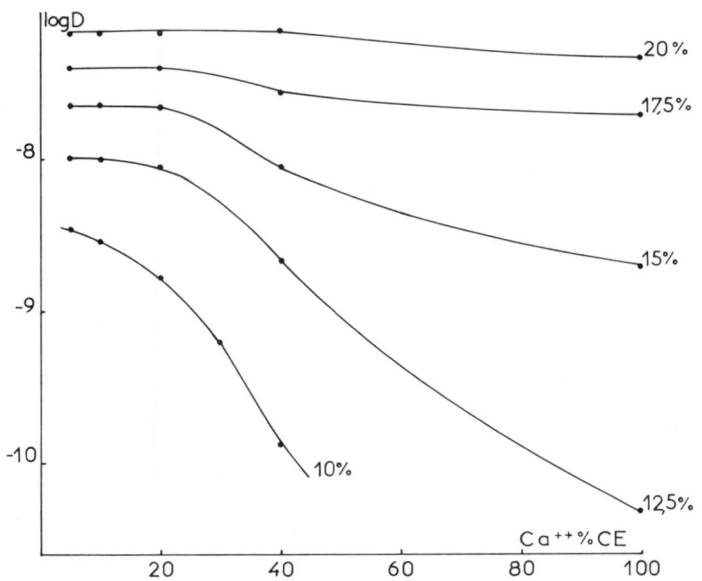


FIG. 35. — *Variation du logarithme du coefficient de diffusion du calcium dans une argile biionique* (Na-Ca) *en fonction de la saturation en calcium pour différentes teneurs en eau*

elle intervient dans un domaine de variation de la teneur en calcium peu étendu. Elle se superpose à l'effet précédent en modifiant la diffusion de la façon suivante. Dans une argile sodique contenant 10 p. 100 d'eau tous les feuillets écartés sont caractérisés par un espacement d_{001} de 12,4 Å, et les cations sodium ont une hydratation correspondant à l'état 1. Cela est encore vrai quand l'argile contient moins de 33 p. 100 de calcium, à la même teneur en eau. Avec une proportion de calcium supérieure à 33 p. 100, et toujours pour la même teneur en eau, les feuillets ont un écartement plus grand (d_{001} = 15,5 Å) qui est celui de l'état 2. Dans ces conditions, les cations Na^+ se trouvent dans un espace interlamellaire du type état 2 avec une hydratation du type état 1 du fait de la faible quantité d'eau, et l'énergie d'activation est alors modifiée. Ainsi, pour un cation sodium entouré par trois molécules d'eau, $E_\perp$ est de 2,6 kcal mole^{-1} si l'espacement est d_{001} = 12,4 Å ; quand d_{001} est égal à 15,5 Å, $E_\perp$ est de 6,2 kcal mole^{-1}. Cet effet diminue quand la teneur en eau augmente, car l'hydratation du sodium augmente aussi.

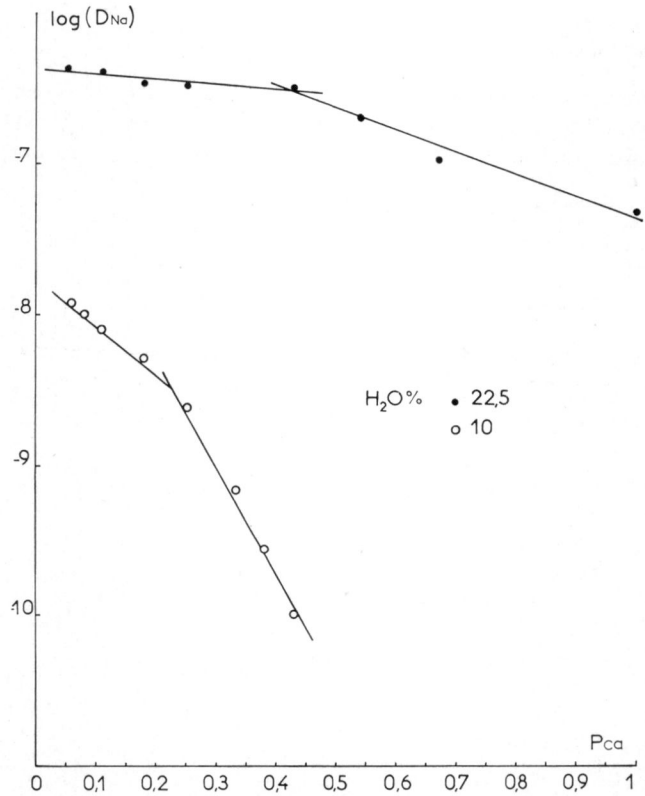


FIG. 36. — *Variation du logarithme du coefficient de diffusion du sodium dans une argile biionique* (Na-Ca) *en fonction de la proportion d'ions* Ca^{++}

La figure 36 représente log (D_{Na}) = $f(P_{Ca})$, où P_{Ca} est la proportion de cations Ca^{++}. Il apparaît que la relation (9) est approximativement vérifiée, sauf pour les valeurs de P_{Ca} inférieures à 0,05. Cette limite correspond à une modification de la loi de variation de log (D_{Na}) en fonction du pourcentage de la capacité d'échange

saturée par le calcium (voir fig. 35). Quand P_{Ca} est supérieure à 0,05, deux domaines peuvent être définis. Pour 10 p. 100 d'eau, la transition entre ces domaines se produit à une teneur en calcium qui représente 37 p. 100 de la capacité d'échange, donc à une teneur voisine de celle qui caractérise le changement de phase (33 p. 100). Celui-ci peut alors expliquer la variation de la pente des droites, car l'énergie d'activation augmente quand d_{001} passe de 12,4 Å à 15,5 Å. Pour une teneur en eau de 22,5 p. 100, les pentes des domaines sont plus faibles qu'à 10 p. 100. Ceci est conforme à la prévision précédente concernant la diminution de l'effet de Ca^{++} quand la teneur en eau augmente (E′ 10 p. 100 > E′ 20 p. 100). La séparation des deux domaines est beaucoup moins nette, et elle apparaît pour une valeur de P_{Ca} de l'ordre de 0,43. Étant donné qu'il n'y a plus lieu de parler de changement de phase, il faut alors supposer qu'à partir du moment où le nombre de cations Na^+ devient égal ou inférieur au nombre de cations Ca^{++}, la relation $E = f(P_{Ca})$ est modifiée (par E′). Ceci existe certainement à 10 p. 100, mais est masqué par la forte variation de l'énergie d'activation.

b) *Diffusion du calcium* $C_1 = Ca^{++}$; $C_2 = Na^+$.

Conformément aux tableaux 26 et 29, l'énergie d'activation doit diminuer quand la teneur en sodium augmente, entraînant une augmentation du coefficient de diffusion.

Le graphique 37 représente $\log D_{Ca} = f(P_{Na})$ où P_{Na} est la proportion d'ions Na^+.

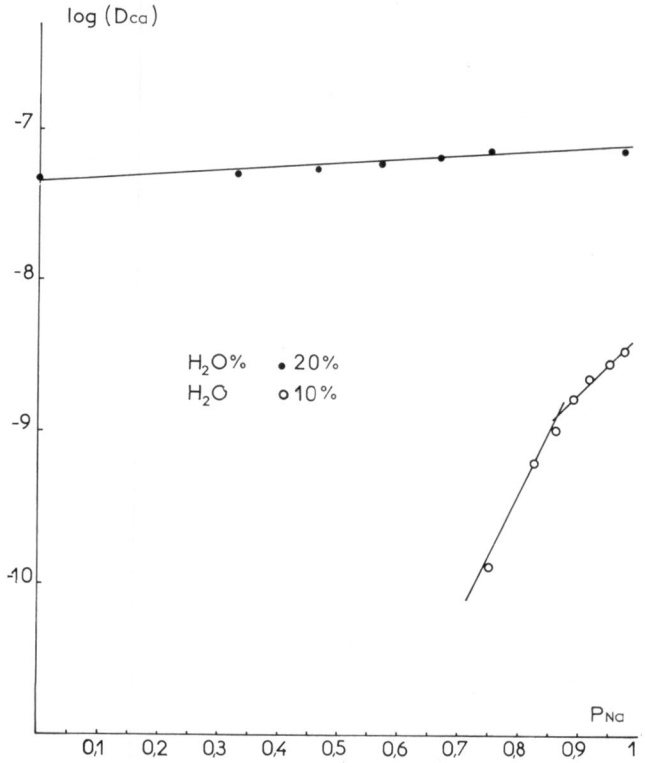


FIG. 37. — *Variation du logarithme du coefficient de diffusion du calcium dans une argile biionique* (Na-Ca) *en fonction de la proportion d'ions* Na^+

La relation (9) est également vérifiée mais deux différences s'observent par rapport au cas précédent :

— un seul domaine apparaît à 20 p. 100 d'eau,

— la pente des droites est positive. Ceci s'écrit $E_{Ca} = E - P_{Na}E'$ et traduit une diminution de l'énergie d'activation quand la teneur en sodium augmente, ce qui confirme nos prévisions. Cet effet est d'autant moins marqué qu'il y a plus d'eau.

Pour 10 p. 100 d'eau, la séparation des domaines correspond à une quantité de calcium représentant 25 p. 100 de la capacité d'échange. Là encore, l'existence du changement de phase peut expliquer cette observation. De plus, on constate que l'effet dépressif du sodium sur E_{Ca} est moins important quand la teneur en sodium est grande.

L'influence particulière du sodium sur la diffusion du calcium peut aider à comprendre certaines observations relatives à l'altération des micas. En effet, la présence de petites quantités de sodium entraîne une augmentation de l'extraction du potassium par le calcium (MAMY, 1970), ce qui s'explique très bien à la lumière des résultats précédemment exposés.

V. — CONCLUSION

Utilisant un modèle constitué par un cation et trois molécules d'eau, nous avons étudié les propriétés liées aux mouvements de ce cation, dont les principales sont la fréquence de vibration et l'énergie d'activation. L'introduction de perturbations dans ce modèle nous a permis de mettre en évidence les effets sur la diffusion du nombre de molécules d'eau adsorbées, de la position de ces molécules et de la composition de l'argile. Ces renseignements joints à la connaissance des caractéristiques de l'hydratation nous ont permis à la fois d'expliquer les résultats expérimentaux obtenus et de proposer un mécanisme relatif aux mouvements des cations compensateurs.

Les principaux résultats exposés au cours de cette étude peuvent être résumés de la façon suivante.

Les mesures d'autodiffusion se rapportent au déplacement d'un cation M^+ dans une argile saturée par des cations M^+. Elles montrent que la mobilité cationique se classe dans l'ordre :

$$Cs^+ < Rb^+ < Na^+$$

Elle augmente quand la teneur en eau de l'argile augmente.

Les coefficients d'hétérodiffusion concernent le déplacement d'un cation X^+ dans une argile saturée par les cations M^+. Ils suivent le même type de loi de variation en fonction de l'hydratation. Ils permettent de mettre en évidence les effets de compétition entre cations : un cation diffuse d'autant moins que son affinité pour l'eau est faible par rapport à celle des autres cations du milieu. Ce point est particulièrement bien illustré par la diffusion du sodium dans des argiles lithiques ou calciques pour lesquelles :

$$D^{Na}_{Na} > D^{Li}_{Na} > D^{Ca}_{Na} \quad \text{et} \quad E^{Na}_{Na} < E^{Li}_{Na} < E^{Ca}_{Na}$$

De plus, le déplacement d'un cation dans une argile saturée par des cations qui s'hydratent moins fortement, entraîne une augmentation locale de l'ordre des molécules d'eau. Il y a diminution de l'ordre dans le cas contraire. Ainsi :

$$\Delta S_{Na}^{Cs} < 0 \qquad \text{et} \qquad \Delta S_{Na}^{Li} > 0$$

L'hétérodiffusion à dilution finie est le déplacement d'un cation X^+ dans une argile saturée par des cations M^+ et X^+. L'ensemble des résultats peut s'expliquer sur la base de l'hydratation compétitive des cations (deuxième règle). Les observations les plus importantes concernent les argiles biioniques (Na-Ca), où le calcium diminue la mobilité du sodium, et le sodium augmente la mobilité du calcium.

D'une façon générale, tous les mouvements ioniques étudiés sont déterminés par les interactions entre les cations et les molécules d'eau qui interviennent de deux façons. Elles conditionnent l'écartement des feuillets et contribuent ainsi à augmenter l'espace disponible pour le déplacement des cations. Elles fixent en grande partie les paramètres du coefficient de diffusion, comme la fréquence de vibration, la variation d'entropie et l'énergie d'activation. L'analyse des valeurs de cette énergie montre que les déplacements des cations se font probablement par un mécanisme d'échanges cycliques.

Enfin, il faut souligner l'intérêt des mesures d'hétérodiffusion qui révèlent un aspect complexe des propriétés des argiles biioniques. Il apparaît que la mobilité d'un cation donné peut varier d'une façon considérable suivant la saturation ionique de la montmorillonite. Certains cations, par leur effet sur les propriétés de l'eau, peuvent l'accroître ou la diminuer. Ces résultats sont très importants. Ils contribuent, non seulement à fournir des explications sur la diffusion, mais ils font aussi entrevoir des mécanismes susceptibles d'intervenir dans l'altération des minéraux et les phénomènes de membranes minérales ou biologiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail n'a pas la prétention d'avoir décrit d'une façon complète l'ensemble des propriétés de la montmorillonite. Nous avons cherché à montrer comment une analyse parfois très simple pouvait apporter un certain nombre d'explications relatives aux phénomènes physico-chimiques dont l'argile est le siège.

Étant donné qu'il est impossible de décrire totalement une argile hydratée ou tout autre système complexe, l'étape déterminante de l'étude est la définition de modèles. Il ne faut pas considérer cette attitude comme une démission devant les difficultés rencontrées, mais bien comme le seul moyen d'apporter des éléments de solution aux problèmes posés. Un modèle doit contenir les paramètres essentiels qui définissent le système, et doit les faire apparaître de la façon la plus claire et la plus précise possible. Il peut être introduit de deux manières différentes selon la nature et le nombre d'informations utilisables. Ainsi sera-t-il, soit une description simplifiée et idéalisée permettant l'application commode de théories physiques existantes, soit une description d'un état moyen obtenu en tenant compte de la superposition dans l'espace de plusieurs propriétés localisées. Il faut ajouter que la définition d'un modèle gagne à être accompagnée, au moins dans un premier temps, de la recherche des aspects les plus simples du problème traité.

La validité des modèles et des approximations qui les accompagnent peut être appréciée à la fois par le degré de généralité des interprétations qui s'en déduisent et par les comparaisons entre les propriétés de l'argile qu'ils permettent de prévoir et les résultats expérimentaux. Au cours de ce travail, nous avons eu de multiples occasions de souligner le rôle des modèles choisis et nous pouvons constater qu'il nous ont permis de proposer un ensemble d'explications cohérentes tant pour les phénomènes d'hydratation de la montmorillonite que pour les mouvements des cations compensateurs. L'accord fréquemment signalé entre les valeurs calculées pour certains paramètres (énergies d'activation par exemple) et les valeurs mesurées, entre les classements prévus des propriétés du minéral et les classements observés, nous montrent que les descriptions proposées représentent convenablement les phénomènes étudiés.

Qu'il s'agisse de son aspect évolutif ou de son aspect quantitatif, l'hydratation de la montmorillonite dépend étroitement de la présence et de la nature des cations compensateurs. Le problème général de l'adsorption peut être envisagé en étendant ces considérations à d'autres adsorbants, tels que les phyllites à charges tétraédriques, les micas et leurs produits d'altération, les divers composés minéraux et organiques des sols, et à d'autres adsorbats comme les corps organiques. L'étude des mécanismes de l'hydratation nous a conduit, en outre, à analyser les origines de la cohésion entre les feuillets et à définir les facteurs essentiels de sa permanence ou de sa disparition. Il s'agit là d'éléments particulièrement importants pour l'étude du gonflement et de la dispersion, dont l'extension aux relations interparticulaires doit conduire à un ensemble de connaissances primordiales pour comprendre, décrire et éventuellement modifier les propriétés mécaniques des sols.

Les études de diffusion ont nécessité l'analyse détaillée des contraintes énergétiques et stériques imposées par le réseau aux mouvements des cations compensateurs. Elles ont mis en évidence le rôle absolument déterminant des interactions entre les cations et les molécules d'eau, conduisant ainsi à la notion d'hydratation compétitive, base de l'interprétation d'un grand nombre de résultats expérimentaux.

L'examen des mouvements des ions dévoile la nature et les modalités des mécanismes élémentaires de l'échange d'ions, en montrant comment s'effectue le passage entre les positions d'équilibre sur la surface du minéral et les positions transitoires dans la phase solvatante. Ces dernières peuvent d'ailleurs devenir elles-mêmes des positions d'équilibre quand l'argile contient des sels libres. Il est alors possible d'envisager l'extension de ces notions aux problèmes relatifs aux sélectivités d'adsorption.

De plus, nos conclusions dépassent largement le cadre de l'étude des mouvements ioniques sur la surface des feuillets de montmorillonite, car les mécanismes qui ont été décrits ont une portée beaucoup plus générale, soit par leurs caractéristiques propres, soit par les facteurs qu'ils font intervenir. Les connaissances acquises permettent de jeter quelques lumières sur le fonctionnement des échangeurs d'ions pris dans le sens le plus général, révélant ainsi de nombreuses applications. En pédologie où les phénomènes d'altération par échange représentent un ensemble de problèmes incomplètement résolus ; dans le domaine de la nutrition minérale des plantes où les transferts d'ions vers la racine et dans le voisinage immédiat de celle-ci sont très mal connus; en biophysique où certains phénomènes relatifs aux membranes attendent encore de recevoir des descriptions plus complètes. Il faut évidemment souligner les limites de telles extensions, en particulier aux systèmes biologiques, en

insistant sur la nécessité de pouvoir définir des éléments analogues à ceux définis pour la montmorillonite : la surface, les charges électriques, les valeurs et les variations du champ électrique sur la surface. Des applications aussi nombreuses sont possibles car la montmorillonite peut être considérée comme un modèle pour l'analyse de certains aspects des mécanismes physico-chimiques relatifs aux mouvements ioniques.

Reçu pour publication en mai 1972.

SUMMARY

HYDRATION OF MONTMORILLONITE AND DIFFUSION OF EXCHANGEABLE CATIONS

II. — DIFFUSION OF EXCHANGEABLE CATIONS IN MONTMORILLONITE

The measure of the diffusion coefficients is used to study the mobility of the exchangeable cations. Since the water content of the clays used does not exceed 30 p. 100, the measures are performed with pellets made of clay powder. The diffusion coefficients are determined by a numerical method of adjustement from the distribution curves of radioactive tracers.

The experimental results concern three types of measurements :

— Autodiffusion : diffusion of a cation M in a clay saturated by cations M. These measurements show that the cationic mobility increases in the following order : $Cs^+ < Rb^+ < Na^+$. It also increases as the water content of the clay is raised.

— Heterodiffusion at infinite dilution : diffusion of a cation X in a clay saturated by cations M. The measured coefficients are those of sodium in Li^+, K^+, Rb^+, Cs^+ and Ca^{++} clays, and of rubidium in Li^+, Na^+, K^+ and Cs^+ clays. They are also an increasing function of the water content of the mineral. These coefficients show that the hydration energy of the diffusing cation is an important parameter.

— Heterodiffusion at finite dilution : diffusion of a cation X in a biionic clay saturated by cations X and M. These measurements concern essentially the diffusion of sodium and calcium in (Na-Ca) clays. The main result is : the diffusion coefficient of Na^+ decreases as the calcium content increases, and on the contrary, the diffusion of calcium is rising at the same time as the sodium content.

All these results are interpreted with the aid of the theory of rate processes taking into account the different interaction energies which can be defined in the interlamellar space.

ZUSAMMENFASSUNG

HYDRIERUNG DES MONTMORILLONIT-TONS UND DIFFUSION DER KOMPENSATIONSKATIONE

II. — UNTERSUCHUNG DER DIFFUSION DER KOMPENSANIONS-KATIONE IN DEN MONTMORILLONITE

Die Untersuchung der Beweglichkeit der KompensationsKations beruht auf der Messung der Diffusionskoeffizienten (Faktoren) in zussammengepressten Tonpulvern. Die Koeffizienten werden auf Grund von Verteilungskurven eines Radioaktiven Spurenelements durch eine numerische Anpassungsmethode bestimmt.

Die Versuchsergebnisse betreffen drei Arten von Messungen.

— Antodiffusionsmessungen : Sie zeigen dass die kationischen Beweglichkeiten in folgender Reihenfolge geordnet werden : Cs^+ Rb^+ Na^+. Je hydrierter der Ton, desto höher sind die Beweglichkeiten.

— Heterodiffusionsmessungen mit unendlicher Verdilnnung : Die gemessenen Koeffizienten beziehen sich auf Natron in gesättigtem Ton durch Li^+, K^+, Rb^+, Cs^+ and Ca^{++}, und auf die Diffusion von Rubidium in von Li^+, Na^+, K^+, Cs^+ gesättigtem Ton. Sie sind ebenfalls eine ansteigende Funktion des Wassergehaltes der Erde und zeigen folgende Tatsache : Ein Kation diffundiert desto weniger als er weniger hydrophil ist im Vergleich mit den anderen Kationen im Medium.

— Heterodiffusionsmessungen : Es handelt sich um die Diffusion von Natrium und Calcium in bi-ionischen Ton, der uns zu diesen Messungen diente. Es wurde klar dass der Diffusionskoeffizient des Natriums dann sinkt wenn der Ca^{++} Gehalt steigt und, umgekehrt, der Diffusionskoeffizient des Calciums umso höher ist der Na^+ Gehalt grösser ist.

Die Deutung dieser Messgungen wurde unter Anwendung der Theorie der absoluten Reaktionsgeschwindigkeiten durchgeführt.

РЕЗЮМЕ

Гидратация монтмориллонита и диффузия катионов-компенсаторов. II — Изучение диффузии катионов-компенсаторов в монтмориллоните.

Р. КАЛЬВЭ.

Изучение подвижности катионов-компенсаторов основано на измерении коэффициентов их диффузии в прессованных порошках из глины. Коэффициенты определяются исходя из кривых распределения радиоактивной метки, методом числового урегулирования.

Результаты экспериментов относятся к трем типам измерений :

— Измерения автодиффузии. Они показывают что подвижность катионов располагается в следующем порядке : $Cs^+ < Rb^+ < Na^+$. Чем сильнее гидратация глины, тем более подвижны катионы.

— Измерения бесконечно разбавляемой гетеродиффузии. Измерены коэффициенты диффузии натрия в глинах насыщенных Li^+, K^+, Rb^+, Cs^+ и Ca^{++}, и рубидия в глинах насыщенных Li^+, Na^+, K^+ и Cs^+. Они являются также возрастающей функцией содержания влаги в минерале, и выявляют следующий факт : катион диффундирует тем слабее, чем меньше его сродство с влагой по сравнению с другими катионами среды.

— Измерение гетеродиффузии. Диффузия натрия и кальция в двухионных глинах являлась главным предметом этого измерения. Оно показывает что коэффициент диффузии натрия уменьшается по мере увеличения содержания Ca^{++} и что, наоборот, коэффициент диффузии кальция увеличивается по мере увеличения содержания Na^+.

Приводится общая интерпретация проведенных измерений, при помощи теории абсолютных скоростей реакций.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adda Y., Philibert J., 1966. *La diffusion dans les solides.* 1268 p., Presses Universitaires de France.

Anderson D. M., 1966. Phase composition of frozen montmorillonite-water mixtures from heat capacities measurements. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 670-675.

BADER R. F. W., 1960. The use of the Hellmann-Feynman theorem to calculate molecular energies. *Can. J. Chem.*, **38**, 2117-2127.

BADER R. F. W., JONES G. A., 1961. The Hellmann-Feynman theorem and chemical binding. *Can. J. Chem.*, **39**, 1253-1265.

BADER R. F. W., 1962. On the evaluation of certain two- and three-center molecular integrals occuring in electrostatic calculations. *Can. J. Chem.*, **40**, 2140-2145.

BADER R. F. W., JONES G. A., 1963. The electron density distributions in hybride molecules. I. The water molecule. *Can. J. Chem.*, **41**, 586-606.

BARNETT M. P., COULSON C. A., 1951. The evaluation of integrals occuring in the theory of molecular structure. Part I and II. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, London, **243** A, 221-249.

BARSHAD I., 1952. Factors affecting the interlayer expansion of vermiculite and montmorillonite with organic substances. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 176-182.

BASOLO F., PEARSON R. G., 1960. *Mechanisms of inorganic reactions.* 462 p., John Wiley and Sons, New York.

BOTTCHER C. J. F., 1952. *Theory of electric polarization*, 492 p., Elsevier, Amsterdam.

BUCKINGHAM A. D., 1957. A theory of ion solvent interaction. *Disc. Farad. Soc.*, **24**, 151-157.

BURNELLE L., COULSON C. A., 1957. Bond dipole moments in water and ammonia. *Trans. Farad. Soc.*, **53**, 403-405.

CALVET R., 1967. La diffusion dans les systèmes argile-eau. II. - Diffusion des cations. *Ann. agron.*, **18** (4), 429-444.

CALVET R., CHAUSSIDON J., 1967. Autodiffusion des ions Na^+ dans la montmorillonite aux faibles états d'hydratation. *Bull. Gr. Fr. Argiles*, **19** (1), 91-99.

CALVET R., 1969. Autodiffusion des ions adsorbés sur la montmorillonite. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **268**, 2541-2543.

CALVET R., CHAUSSIDON J., 1969. Diffusion des cations compensateurs dans la montmorillonite aux faibles hydratations. *Proc. Internation Clay Conf.*, **1**, 635-647.

CALVET R., PROST R., 1971. Cation migration into empty octahedral sites and surface properties of clays. *Clays and clay Minerals*, **19**, 175-186.

CHAUSSIDON J., 1963. Évolution des caractéristiques chimiques et cristallographiques de montmorillonites biioniques K-Ca, au cours d'alternances répétées d'humectation-dessiccation. *Proc. Internation. Clay Conf.*, Stockholm, 195-201.

CLEMENTI E., RAIMONDI D. L., 1963. Atomic screening constants from SCF functions. *J. Chem. Phys.*, **38** (11), 2686-2689.

CRANK J., 1964. *The mathematics of diffusion.* 345 p., Clarendon Press, Oxford.

EISENBERG D., KAUZMANN W., 1969. *The structure and properties of water.* 296 p., Clarendon Press, Oxford.

GLAESER R., 1953. *Complexes organo-argileux et rôle des cations échangeables.* 68 p., Thèse Fac. Sci, Paris.

GONCHAROV V. V., ROMANOVA I. I., SAMOILOV O. J. A., YASHKICHEV V. I., 1967. Quantitative characteristics of the near hydration of some ions in weak aqueous solutions. I. - Self diffusion activation energy. *Zh. Strukt. Khim.*, **8** (4), 613-617.

HAGGIS G. H., HASTED J. B., BUCHANAN T. J., 1952. The dielectric properties of water in solutions. *J. Chem. Phys.*, **20** (9), 1452-1465.

HARRIS F. E., O'KONSKI C. T., 1957. Dielectric properties of aqueous ionic solutions at microwave frequencies. *J. Phys. Chem.*, **61**, 310-319.

HINDMAN J. C., 1962. Nuclear magnetic resonance effects in aqueous solutions of 1-1 electrolytes. *J. Chem. Phys.*, **36** (4), 1000-1015.

HOEKSTRA P., 1965. Conductance of frozen bentonite suspensions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 519-521.

HURLEY A. C., 1954 *a*. The electrostatic calculation of molecular energies. I. - Methods of calculating molecular energies. *Proc. Roy. Soc.*, **226** A, 170-178.

HURLEY A. C., 1954 *b*. The electrostatic calculation of molecular energies. II. - Approximate wave functions and the electrostatic method. *Proc. Roy. Soc.*, **226** A, 179-192.

HURLEY A. C., 1954 *c*. The electrostatic calculation of molecular energies. III. - The binding energies of saturated molecules. *Proc. Roy. Soc.*, **226** A, 193-205.

HURLEY A. C., 1956. The electrostatic calculation of molecular energies. IV. - Optimum paried-electron orbitals and the electrostatic method. *Proc. Roy. Soc.*, **235** A, 224-234.

LAI T. M., MORTLAND M. M., 1968. Cationic diffusion in clay minerals : I. - Homogeneous and heterogeneous systems. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (1), 56-61.

LANDAU L., LIFCHITZ E., 1966. *Mécanique quantique.* 718 p. Éditions MIR, Moscou.

LATIMER W. M., PITZER K. S., SLANSKY C. M., 1939. The free energy of hydration of gaseous ions and absolute potential of the normal calomel electrode, *J. Chem. Phys.*, **7**, 108-111.

LEVINE H. S., MAC CALLUM C. J., 1960. Grain boundary and lattice diffusion in polycrystalline bodies. *J. applied Phys.*, **31** (3), 595-599.

LOWDIN P. O., 1953. Study of atomic self-consistent fields. I. - Calculation of slater functions. *Phys. Rev.*, **90** (1), 120-125.

MACKENZIE R. C., 1950. Some notes on the hydration of montmorillonite. *Clay mineral. Bull.*, **1**, 115-119.

Mc CALL D. W., DOUGLAS D. C., 1965. The effect of ions on the self diffusion of water I. - Concentration dependance. *J. Phys. Chem.*, **69** (6), 2001-2011.

MAMY J., 1968. *Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite : propriétés diélectriques et structure du film d'eau.* 113 p., Thèse Fac. Sci. Paris.

MAMY J., 1970. Extraction of interlayer K from phlogopite. Specific effects of cations. Roles of Na and H concentrations in extraction solutions. *Clays and clay Minerals*, **18**, 157-163.

MARGENAU H., MYERS V. W., 1944. The forces between water molecules and the second virial coefficient of water. *Phys. Rev.*, **66** (11), 307-315.

MERING J., BRINDLEY G. W., 1967. X-ray diffraction band profiles of montmorillonite. Influence of hydration and of the exchangeable cations. *Clays and clay Minerals*, **27**, 51-62.

MULLIKEN R. S., RIEKE C. A., ORLOFF D., ORLOFF H., 1949. Formules and numerical tables for overlap integrals. *J. Chem. Phys.*, **17** (12), 1248-1267.

MULLIKEN R. S., 1955 *a*. Electronic population analysis on LCAO-MO molecular wave functions. I. *J. Chem. Phys.*, **23** (10), 1833-1840.

MULLIKEN R. S., 1955 *b*. Electronic population analysis on LCAO-MO molecular wave functions. II. - Overlap populations, bond orders, and covalent bond energies. *J. Chem. Phys.*, **23** (10), 1841-1846.

MURRMANN R. P., HOEKSTRA P., BIALKOWSKI R. C., 1968. Self diffusion of sodium ions in frozen wyoming bentonite-water paste. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (4), 501-506.

MUSULIN B., 1956. Molecular screening constants. *J. Chem. Phys.*, **25** (5), 801-803.

NORRISH K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Disc. Farad. Soc.*, **18**, 120-134.

OBERLIN A., MERING J., 1962. Observations en microscopie et microdiffraction électroniques sur la montmorillonite Na. *J. Microscopie*, **1**, 107-120.

PAULING L., 1960. *The nature of the chemical bond.* 644 p., Cornell Univ. Press, New York.

PEZERAT H., MERING J., 1967. Recherches sur la position des cations échangeables et de l'eau dans les montmorillonites. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **265**, 529-532.

PHILLIPS R. E., 1969. Test of constancy of self diffusion coefficients. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33** (2), 322-324.

POPLE J. A., 1950. The molecular orbital theory of chemical valency. V. - The structure of water and similar molecules. *Proc. Roy. Soc.*, **202** A, 323-336.

POPLE J. A., SANTRY D. P., SEGAL G. A., 1965. Approximate self consistent molecular orbital theory. I. - Invariant procedures. *J. Chem. Phys.*, **43** (10), S 129-S 135.

PULLMAN B., PULLMAN A., 1952. *Les théories électroniques de la chimie organique.* 665 p., Masson, Paris.

ROOTHAAN C. C. J., 1951. A study of two center integrals useful in calculations on molecular structure. *J. Chem. Phys.*, **19** (12), 1445-1458.

SALEM L., 1966. Forces intermoléculaires à long rayon d'action. *Colloque C. N. R. S.*, septembre 1965, Bordeaux, 79-87.

SAMOILOV O. J. A., MALENKOV G. G., 1967. Quantitative characteristics of the near hydration of some ions in weak aqueous solutions. II. - Change in the orientation of water molecules near ions. *Zh. Strukt Khim*, **8** (4), 618-621.

SHAINBERG I., KEMPER W. D., 1966 *a*. Conductance of adsorbed alkali cations in aqueous and alcoholic bentonite pastes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30** (6), 700-706.

SPOSITO G., 1955. On the general theory of the clay water interaction. *University microfilms*, inc. Michigan.

VESSEREAU A., 1948. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie.* Tome II, 377 p., J.-B. Bailieu et fils.

ZENER C., 1950. Ring diffusion in metals. *Acta Cryst.*, **3**, 346-354.

ANNEXE I

DISTRIBUTION DES CAVITÉS CHARGÉES

Les probabilités données dans les tableaux 4 et 5 ont été obtenues par des comptages. Examinons un exemple pour illustrer le procédé utilisé.

Soit une surface avec N cavités hexagonales. On effectue un tirage au hasard de N_T cavités ($N_T = p \cdot N$, où p est la probabilité élémentaire d'avoir une cavité chargée). Ces N_T cavités tirées représentent donc N_T cavités chargées.

On compte le nombre de cavités chargées pour lesquelles la cavité chargée la plus proche se trouve à la distance d_1. Soit n_1 ce nombre. Le rapport n_1/N_T représente la probabilité p_1 d'avoir à la distance d_1 la cavité chargée la plus proche d'une cavité chargée donnée. D'une façon générale, en comptant le nombre n_i de cavités chargées pour lesquelles la cavité chargée la plus proche se trouve à la distance d_i, on obtient la probabilité p_i d'avoir à la distance d_i la cavité chargée la plus proche d'une cavité chargée donnée. On peut également procéder de la même manière pour les cavités chargées ayant la deuxième, la troisième..., la n^{ieme} cavité chargée la plus proche à d_i.

Ces opérations sont répétées pour 1 000 tirages. On effectue ensuite les moyennes des 1 000 valeurs de p_i.

Le problème essentiel est d'obtenir des tirages au hasard. La méthode utilisée est la suivante. La surface est représentée dans un système d'axes de coordonnées triangulaires (fig. A 1). Le

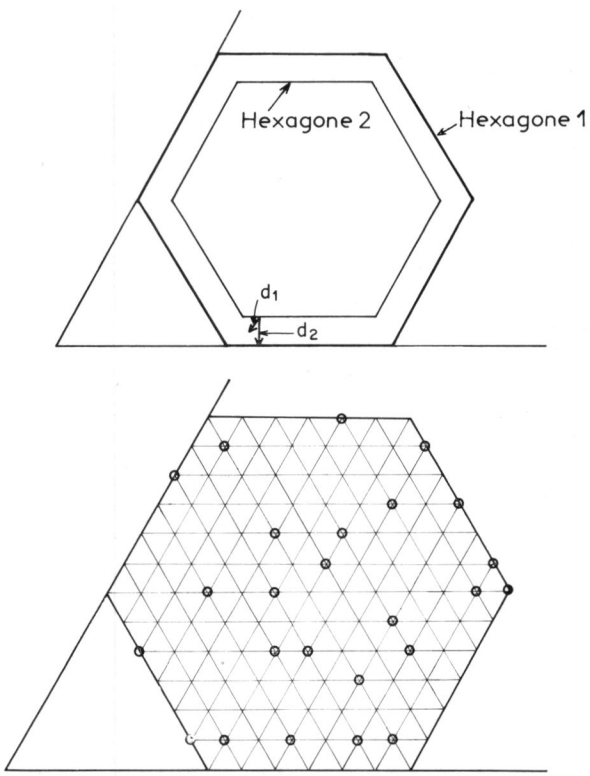


FIG. A 1. — *Représentation d'une répartition au hasard des cavités hexagonales chargées*

tirage d'une cavité est obtenue en tirant au hasard les valeurs de ses coordonnées à l'aide d'une fonction génératrice de nombres aléatoires. Les limites des valeurs des coordonnées sont choisies de telle sorte que tous les tirages possibles soient situés dans un hexagone (hexagone n° 1 figure A 1. Cependant, les cavités situées sur les bords de cet hexagone n'ont pas le même entourage que celles se trouvant au milieu. Pour limiter cet inconvénient dans les comptages, nous n'avons pris en considération que les cavités situées à l'intérieur d'un hexagone plus petit (hexagone n° 2, figure A 1). Ainsi, toutes les cavités de ce dernier ont le même entourage jusqu'à la distance d_2 comprise. Les calculs ont été exécutés avec un nombre total de cavités N = 331 (ce nombre correspond à des particules d'un diamètre équivalent de 0,01 μ). Nous nous sommes limité à cette valeur pour des raisons de temps de calcul.

La figure A 1 représente une distribution au hasard correspondant à N = 127.

Ces calculs ont été réalisés à l'aide d'un programme écrit en FORTRAN V pour un ordinateur Univac 1108.

ANNEXE II

CALCUL DE L'ÉNERGIE POTENTIELLE D'UN CATION DANS LE CHAMP ÉLECTRIQUE DÛ A LA CHARGE RÉSULTANT D'UNE SUBSTITUTION ISOMORPHIQUE : WOH

A. — *Description des modèles utilisés*

1. *Modèle relatif au réseau.*

Considérons trois octaèdres contigus, dont deux ont leur centre occupé par un cation (fig. A 2) et admettons que l'ensemble des charges des octaèdres I et II centrés sur les cations R et R′ peut être décrit indépendamment des autres atomes du réseau.

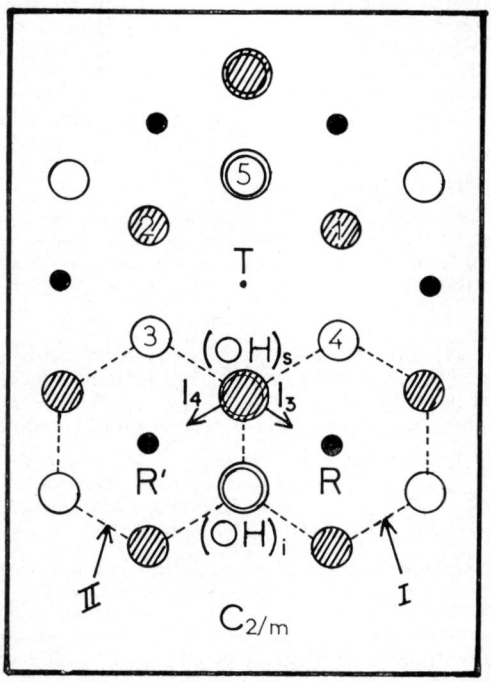


FIG. A 2. — *Projection des atomes de la couche octaédrique sur le plan des Al*

Soient q_3 et q_4 les charges portées par les atomes d'oxygène des octaèdres I et II. Étant donné que chaque groupe OH est commun à deux octaèdres, nous diviserons sa charge en deux parties q'_3 et q'_4 correspondant chacune à un octaèdre. Pour l'octaèdre I par exemple, les charges sont : 4 charges q_3, 2 charges q'_3, 1 charge δ_3 qui est la charge du cation R.

Les charges q_3, q'_3, q_4 et q'_4 sont définies par les relations suivantes :

	Octaèdre I	Octaèdre II	
Pas de substitution :	$4q_3 + 2q'_3 + \delta_3 = 0$	$4q_4 + 2q'_4 + \delta_4 = 0$	(1)
1 substitution en R :	$4q_3 + 2q'_3 + \delta_3 = -1$	$4q_4 + 2q'_4 + \delta_4 = 0$	(2)

Si les charges sont uniformément réparties sur les atomes des octaèdres on a :

$$q_3 = q'_3 ; q_4 = q'_4 \tag{3}$$

L'évaluation du champ électrique dû aux octaèdres I et II nécessite l'introduction de plusieurs constantes diélectriques (autant que de charges), ce qui n'est pas possible. Aussi supposerons-nous qu'une approximation est obtenue en utilisant des charges fictives Z_R et $Z_{R'}$ situées en R et R′ et définies de la façon suivante :

Z_R ou $Z_{R'}$ = charge de 4 atomes d'oxygène $+ \frac{1}{2}$ charge de $(OH)_i$ + charge du cation octaédrique (R ou R′).

Les relations (1), (2) et (3) permettent d'écrire :

— pas de substitution :

$$Z_R = Z_{R'} = -q'_3 \tag{4}$$

— 1 substitution, en R par exemple :

$$Z_R = -1 - q'_3 ; Z_{R'} = -q'_4 \tag{5}$$

Dans ces conditions, il suffit d'introduire une seule constante diélectrique ε_H valable pour Z_R et $Z_{R'}$.

Le champ électrique dû au réseau a donc pour origine les charges Z_R, $Z_{R'}$ et la charge q_{OH} de OH. Nous savons que le cation compensateur se trouve à l'aplomb d'une cavité hexagonale située près d'une substitution isomorphique ; il est donc voisin d'un groupe OH chargé (q_{OH}), mais éloigné des centres R et R′ des octaèdres où se trouvent les charges Z_R et $Z_{R'}$. En conséquence, nous utiliserons la distribution spatiale de la charge q_{OH} et nous traiterons les charges Z_R et $Z_{R'}$ comme des charges ponctuelles. Il nous faut alors connaître la charge et la structure électronique du groupe OH.

2. *Modèle relatif au groupe OH.*

La situation géométrique du groupe OH est donnée dans la figure A 3. Par mesure de simplification, nous admettrons que les atomes d'hydrogène des groupes $(OH)_s$ et O_5H sont dans le plan *oxz*, et que la somme des composantes des forces sur H de $(OH)_s$ suivant *oy* est nulle. Il s'agit d'une approximation pour le cas où les cations octaédriques sont différents ($R \neq R'$).

a) *Structure électronique.*

Le groupe OH est décrit à l'aide de quatre orbitales moléculaires (fig. A 4). Compte tenu de ce qui précède, OM est la bissectrice de l'angle α_{34}. Elle est dans le même plan que OH et O*l*, et divise l'angle α_{12} en deux parties β_1 et β_2. De plus, $\alpha_{13} = \alpha_{14}$ et $\alpha_{23} = \alpha_{24}$ (les orbitales des paires libres l_3 et l_4 sont identiques). Les expressions des orbitales sont les suivantes :

$$\begin{array}{lll} \text{Liaison OH...} : & \varphi_1 = \lambda\,[\cos \varepsilon_b(2s) + \sin \varepsilon_b(2p_1)\,] + \mu \cdot (1s_H) & \\ \text{Paires d'électrons libres} \left\{ \begin{array}{l} l \ldots \\ l_3 \ldots \\ l_4 \ldots \end{array} \right. & \begin{array}{l} \varphi_2 = \cos \varepsilon_1(2s) + \sin \varepsilon_1(2p_2) \\ \varphi_3 = \cos \varepsilon_3(2s) + \sin \varepsilon_3(2p_3) \\ \varphi_4 = \cos \varepsilon_4(2s) + \sin \varepsilon_4(2p_4) \end{array} & (6) \end{array}$$

$(1s_H)$ représente l'orbitale 1*s* de l'hydrogène, $(2s)$ et $(2p_i)$ sont les orbitales atomiques centrées sur le noyau de l'oxygène. Les directions des paires libres sont déterminées par p_2, p_3 et p_4 et la direction de la liaison OH est p_1. Dans ces conditions, p_1 représente un axe de symétrie pour la distribution de la charge relative à la liaison OH. Ceci est une approximation compte tenu de l'absence de coïncidence entre les directions p_1 et OH dans la molécule d'eau (Pople, 1950 ; Burnelle et Coulson, 1957 ; Bader et Jones, 1963).

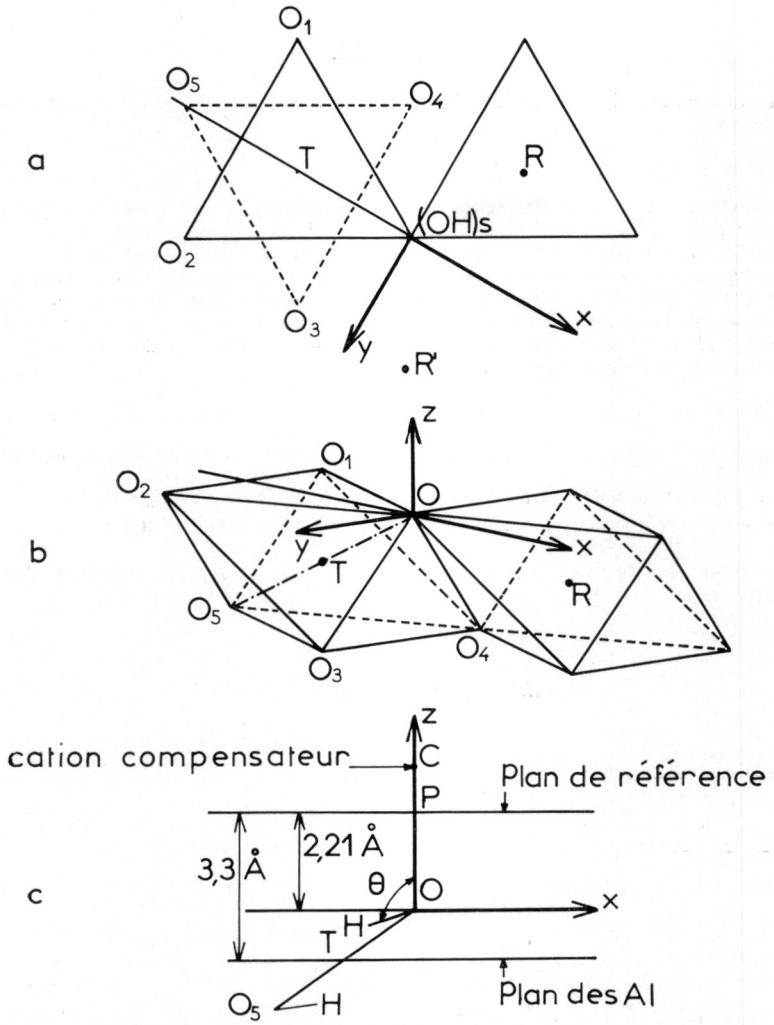


FIG. A 3. — *Représentation de la situation géométrique du groupe $(OH)_s$ et système de coordonnées utilisé*

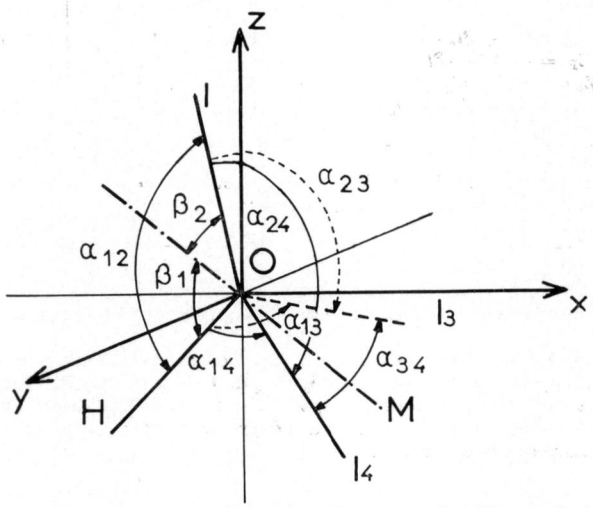


FIG. A 4. — *Directions de la liaison OH et des paires libres l_1, l_3 et l_4*

ε_b, ε_1, ε_3 et ε_4 sont les paramètres d'hybridation et le rapport λ/μ est le facteur de polarité de la liaison OH.

b) *Charge du groupe OH.*

L'orientation du groupe OH est telle que les deux paires d'électrons libres l_3 et l_4 sont respectivement dirigées vers les cations octaédriques R et R′ (fig. A 2). Les orbitales φ_3 et φ_4 doivent donc participer aux deux liaisons entre le groupe OH et les cations R et R′. Nous admettrons que les charges correspondant à ces deux liaisons peuvent être décrites par des charges localisées sur l'atome d'oxygène de OH et sur les cations octaédriques. Dans ces conditions, les orbitales φ_3 et φ_4 décrivent chacune 2 électrons, s'il n'y a pas de transfert de charge sur le cation octaédrique. Elles décrivent un nombre de $(2 - \delta l_3)$ et $(2 - \delta l_4)$ électrons dans le cas contraire. Dès lors, la charge de OH s'exprime par la relation (7)

$$q_{OH} = q'_3 + q'_4 = -[2 + 2 + (2 - \delta l_3) + (2 - \delta l_4)] + 7 = \delta l_3 + \delta l_4 - 1 \qquad (7)$$

Le caractère ionique ou covalent de ces liaisons peut être défini de la façon suivante :

— liaison ionique : transfert nul, charge des cations octaédriques : + 3 ou + 2,

— liaison covalente : transfert non nul, charge des cations octaédriques : 0.

L'utilisation des relations (1), (2), (3), (4), (5) et (7) conduit aux expressions données dans le tableau A 1.

TABLEAU A 1

Définition des charges δl_3, δl_4, ZR et ZR'

Formules (8)

	Cas général	Liaison ionique	Liaison covalente
(1) Pas de substitution	$\delta_3 = \delta_4 = \delta_i$ $\delta l_3 = \delta l_4 = \dfrac{3 - \delta_i}{6}$ $q_{OH} = \delta l_3 + \delta l_4 - 1$ $Z_R = Z_{R'} = 0{,}5 - \delta l_3$ $q\,\Sigma = Z_R + Z_{R'} + q_{OH}$	$\delta_3 = \delta_4 = +3$ $\delta l_3 = \delta l_4 = 0$ $q_{OH} = -1$ $Z_R = Z_{R'} = 0{,}5$ $q\,\Sigma = 0$	$\delta_3 = \delta_4 = 0$ $\delta l_3 = \delta l_4 = 0{,}5$ $q_{OH} = 0$ $Z_R = Z_{R'} = 0$ $q\,\Sigma = 0$
(1) Une substitution en R	δ_3, δ_4 $\delta l_3 = \dfrac{2 - \delta_3}{6}$, $\delta l_4 = \dfrac{3 - \delta_4}{6}$ $q_{OH} = \delta l_3 + \delta l_4 - 1$ $Z_R = -0{,}5 - \delta l_3$ $Z_{R'} = 0{,}5 - \delta l_4$ $q\,\Sigma = Z_R + Z_{R'} + q_{OH}$	$\delta_3 = +2$, $\delta_4 = +3$ $\delta l_3 = 0$, $\delta l_4 = 0$ $q_{OH} = -1$ $Z_R = -0{,}5$ $Z_{R'} = 0{,}5$ $q\,\Sigma = -1$	$\delta_3 = 0$, $\delta_4 = 0$ $\delta l_3 = 0{,}33$, $\delta l_4 = 0{,}5$ $q_{OH} = -0{,}17$ $Z_R = -0{,}83$ $Z_{R'} = 0$ $q\,\Sigma = -1$

(1) Ces relations supposent que le transfert de charge est le même à partir de tous les atomes d'oxygène de l'octaèdre, qu'ils appartiennent ou non à un groupe OH.

$q\Sigma$ représente le bilan des charges correspondant aux deux octaèdres centrés sur les cations R et R′.

Cette description permet d'introduire une distinction entre les liaisons avec les cations R et R′ quand ils sont différents. En faisant varier δ_3 et δ_4 de telle sorte que $q\Sigma$ soit égal à — 1 ou zéro selon qu'il y a une substitution ou non, il est possible de décrire les liaisons entre l'atome d'oxygène (de OH) et les cations octaédriques avec des degrés variables de caractère covalent, et donc de faire varier la charge portée par OH.

B. — *Description du groupe OH*

Les charges Z_R, $Z_{R'}$ et q_{OH} sont connues si les charges δ_3 et δ_4 des cations octaédriques sont fixées (relation 8). Les paramètres qui décrivent le groupe OH sont alors déterminés pour des valeurs données de δ_3, δ_4, ε_H (constante diélectrique relative à Z_R et $Z_{R'}$) et CP. Pour chaque ensemble de valeurs δ_3, δ_4, ε_H et CP, nous disposerons donc d'une description du groupe OH. Après avoir exposé la méthode utilisée pour cette description, nous donnerons quelques exemples de résultats.

1. *Méthode de calcul des paramètres du groupe OH.*

Ces paramètres sont les suivants :

— paramètres d'hybridation des orbitales φ_i : ε_b, ε_1, ε_3, ε_4 ;
— la polarité de la liaison OH : caractérisée par le rapport λ/μ ;
— la longueur OH ;
— la charge portée par le groupe OH : q_{OH} ;
— l'angle fait par la direction OH et le plan (a, b) : $\theta - \frac{\pi}{2}$ (voir figure A 6).

La description du groupe OH peut être obtenue par les méthodes habituellement utilisées pour décrire les molécules (Hurley, 1954 *a*). La méthode variationnelle est la meilleure, mais sa mise en œuvre n'est pas possible car il faut tenir compte de tous les atomes qui entourent le groupe OH (voir figure A 2), et ceci même si des simplifications sont introduites comme dans la méthode C. N. D. O. (Pople *et al.*, 1965). C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'utiliser la méthode électrostatique basée sur le théorème suivant (Hurley, 1954 *c* ; Bader, 1960 ; Bader et Jones, 1961). Les forces qui agissent sur les noyaux dans une molécule, sont celles qui résultent des calculs électrostatiques classiques basés sur l'expression de la densité de charge donnée par la mécanique quantique.

Dans un système en équilibre, la résultante de toutes les forces qui agissent sur chaque noyau doit être nulle. Des exemples d'applications de cette méthode sont donnés par Hurley (1954 *c*, 1956) et par Bader (1960). Nous nous proposons d'appliquer cette méthode pour décrire le groupe OH du réseau dans le cadre des modèles que nous avons définis. Pour cela, il faut étudier la résultante ΣF des forces qui agissent sur le noyau de l'atome d'hydrogène de OH. Les forces qui doivent être prises en considération ont diverses origines :

— le groupe OH : les électrons décrits par φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 et le noyau de l'atome d'oxygène ;
— les atomes d'oxygène de l'octaèdre centré sur T (fig. A 2) : atomes nos 1, 2, 3, 4 ;
— le groupe $(OH)_5$ (fig. A 2) ;
— les charges Z_R et $Z_{R'}$;
— le cation compensateur quand il y a une substitution isomorphique ($R \neq R'$).

a) *Principe du calcul des forces.*

Soit une molécule possédant N noyaux et n électrons. En théorie électrostatique classique, la force f_α exercée par les n électrons sur le noyau α est :

$$\vec{f}_\alpha = - Z_\alpha \cdot e^2 \cdot \sum_{a=1}^{n} \frac{\overrightarrow{R_\alpha(a)}}{R_\alpha^3(a)}$$

Z_α est la charge du noyau α · $\overrightarrow{R_\alpha(a)}$ est le vecteur de position de l'électron a par rapport au noyau α.

En théorie quantique, on introduit l'opérateur $\widehat{F_\alpha} = f_\alpha$

Pour un état du système d'électrons défini par la fonction d'onde $\psi(X_\alpha, x_a)$, la valeur moyenne de la force est :

$$F_\alpha = \frac{\int_v \psi^* \, \widehat{F_\alpha} \, \psi \, dv}{\int_v \psi^* \, \psi \, dv} = \int_v f_\alpha \, \psi^* \, \psi \, dv \qquad \text{si} \qquad \int_v \psi^* \, \psi \, dv = 1$$

X_α : coordonnées du noyau α ; x_a : coordonnées de l'électron a.
ψ^* : conjuguée de ψ

$$\text{ou } \overrightarrow{F_\alpha} = -Z_\alpha \int_v \frac{\overrightarrow{R_\alpha}}{R_\alpha^3} \rho(x, y, z)\, dv$$

(R et F sont exprimés en u. a)

$\rho(x, y, z)$ est la densité électronique totale définie par :

$$\rho(x, y, z) = \sum_a^n \rho_a(x, y, z)$$

$\rho_a(x, y, z)$ représente la densité relative à l'électron a.

Si la force de répulsion sur le noyau α est $\overrightarrow{F_{\alpha n}}$, la force résultante est :

$$\overrightarrow{F'_\alpha} = \overrightarrow{F_{\alpha_n}} - Z \int_v \frac{\overrightarrow{R_\alpha}}{R_\alpha^3} \rho(x, y, z)\, dv$$

b) *Expression des forces.*

Les forces de répulsion dues aux noyaux s'évaluent simplement, alors que les forces d'attraction dues aux électrons nécessitent des calculs plus importants.

α) *Forces dues aux électrons.*

Plusieurs publications donnent la description de ces forces (Hurley, 1954 *c* ; Bader, 1960 ; Bader et Jones, 1961 ; Bader et Jones, 1963).

Soient deux atomes A et B, et une liaison que nous supposerons décrite par une fonction $\psi = N(\varphi_A + \varphi_B)$. φ_A et φ_B sont des orbitales atomiques centrées respectivement sur A et B ; N est le facteur de normalisation. La charge correspondant à cette liaison est distribuée dans l'espace autour des noyaux A et B. Calculons la force qui s'exerce sur le noyau A (fig. A 5).

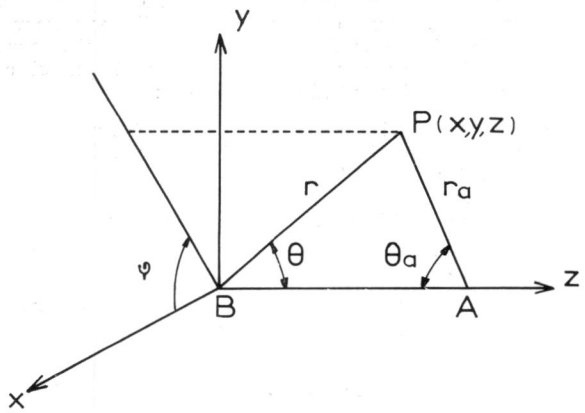


Fig. A 5. — *Système de coordonnées et variables utilisées pour le calcul des intégrales*

Une charge unité située en un point P de coordonnées x, y, z produit un champ électrique en A, dont les composantes sont :

$$E_Z = \frac{\cos\theta_A}{r_A^2} \; ; \; E_X = \frac{\sin\theta_A \cos\varphi}{r_A^2} \; ; \; E_Y = \frac{\sin\theta_A \sin\varphi}{r_A^2}$$

Les composantes de la force sont :

$$-\text{ suivant AB} : f_{AZ} = 2Z_A \int_v E_Z \,|\psi|^2\, dv$$

— perpendiculairement à AB : $f_{AX} = 2Z_A \int_v E_X \mid \psi \mid^2 dv$

$$f_{AY} = 2Z_A \int_v E_Y \mid \psi \mid^2 dv$$

(Z_A est la charge du noyau A, la fonction ψ correspond à deux électrons).

La force f_{AZ} s'écrit :

$$f_{AZ} = 2Z_A N^2 \left[\int_v E_Z \varphi_A^2 \, dv + \int_v E_Z \varphi_B^2 \, dv + 2 \int_v E_Z \varphi_A \cdot \varphi_B \, dv \right]$$

Nous sommes en présence de trois types d'intégrales :

1° $\int_v E_Z \varphi_A^2 \, dv$: force agissant sur une charge unité située en A et due à une charge unité décrite par φ_A. Elle est nulle si φ_A possède une symétrie sphérique.

2° $\int_v E_Z \varphi_B^2 \, dv$: force agissant sur une charge unité située en A et due à une charge unité décrite par φ_B centrée sur B. Les intégrales de ce type ont été calculées par une méthode donnée par BADER (1962).

3° $\int_v E_Z \varphi_A \cdot \varphi_B \, dv$: force agissant sur une charge unité située en A due à une charge unité correspondant au recouvrement des orbitales φ_A et φ_B. Ces intégrales ont été calculées par la méthode de BARNETT et COULSON (1951) (1).

Les mêmes types d'intégrales se retrouvent pour les composantes f_{AX} et f_{AY}.
Exemple : supposons que $\varphi_B = (2s)_B$ et $\varphi_A = (1s)_A$

La liaison AB est décrite par

$$\psi = N \, [(2s)_B + (1s)_A] \text{ avec } N = [2(1 + S)]^{-1/2}$$

S est l'intégrale de recouvrement entre $(2s)_B$ et $(1s)_A$. Elle s'évalue à l'aide de la même méthode que les intégrales du type 3.

On a :

$$f_{AZ} = 2Z_A N^2 \left[\int_v E_Z (2s)_B^2 \, dv + 2 \int_a E_Z (2s)_B \, (1s)_A \, dv \right]$$
$$f_{AX} = f_{AY} = 0$$

L'intégrale $\int_v E_Z (1s)_A^2 \, dv$ est nulle ($(1s)_A^2$: symétrie sphérique).

Les intégrales correspondant à E_X et E_Y sont nulles. Par exemple, l'intégrale

$\int_v E_X (2s)_B^2 \, dv$ fait intervenir l'intégrale $\int_0^{2\pi} \cos \varphi \, d\varphi$ qui est nulle.

Compte tenu de l'expression de ψ, la seule force due aux électrons qui agit sur le noyau A est dirigé suivant AB.

β) *Différentes forces agissant sur le noyau de l'atome d'hydrogène du groupe* (OH_s).

Les composantes de la force due aux électrons décrits par les orbitales φ_1 et φ_2 sont (fig. A 6) :

Suivant OH :

$$ZFH = (2 - \delta l) Z_H \left[\left[(\lambda^2 \cos^2 \varepsilon_b + \cos^2 \varepsilon_1) \, PO_1S + (\lambda^2 \sin^2 \varepsilon_b + \sin^2 \varepsilon_1 \cos^2 \alpha_{12}) \, PO_1P + \sin^2 \varepsilon_1 \cdot \sin^2 \alpha_{12} \, PO_1PI \right] + 2 \left[(\lambda^2 \sin \varepsilon_b \cos \varepsilon_b + \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_{12}) \, PO_1SP + \lambda\mu \, (\cos \varepsilon_b \, JHZS + \sin \varepsilon_b \, JHZP) \right] \right]$$

(1) Les sous-programmes utilisés dans le calcul de ces intégrales nous ont été communiqués par M. le professeur R. F. W. BADER (Mc MASTER University, Hamilton, Ontario, Canada). Nous l'en remercions vivement.

Perpendiculairement à OH :

$$XFH = (2 - \delta l)Z_H \left[2 \sin^2 \varepsilon_1 \sin \alpha_{12} \cos \alpha_{12} \, PO_2PPI + 2 \sin \varepsilon_1 \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_{12} \, PO_2SPI \right]$$

(L'orbitale $p\sigma$ de l'atome d'oxygène est dirigée suivant OZ ; Z_H est la charge du noyau de l'hydrogène).

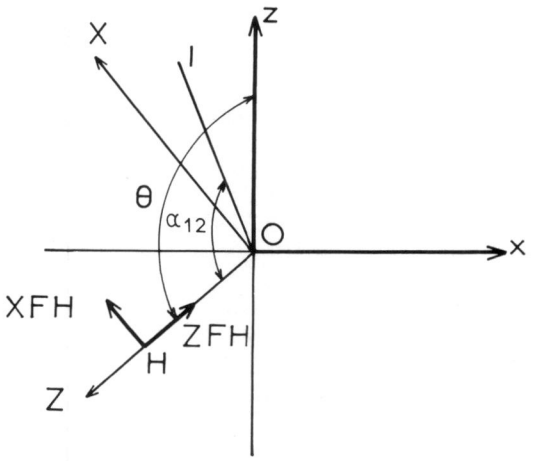


FIG. A 6. — *Système de coordonnées utilisé pour le calcul des forces dues à la liaison OH et à la paire libre*

Les intégrales apparaissant dans les expressions de ZFH et XFH sont les suivantes :

$$PO_1S = \int_v E_Z(2s)^2 \, dv \; ; \; PO_1P = \int_v E_Z(2p\sigma)^2 \, dv \; ; \; PO_1PI = \int_v E_Z(2p\pi)^2 \, dv$$

$$PO_1SP = \int_v E_Z(2s) \, (2p\sigma) \, dv \; ; \; PO_2PPI = \int_v E_X(2p\sigma) \, (2p\pi) \, dv$$

$$PO_2SPI = \int_v E_X(2s) \, (2p\pi) \, dv$$

$$JHZS = \int_v E_Z(2s) \, (1s_H) \, dv \; ; \; JHZP = \int_v E_Z(2p\sigma) \, (1s_H) \, dv$$

Les expressions des forces dues aux électrons décrits par φ_3 et φ_4, au groupe O_5H et aux atomes O_1, O_2, O_3 et O_4 s'écrivent de la même façon et font intervenir des intégrales identiques à celles que nous venons de définir.

Étant donné que les électrons ($1s$) ne sont pas pris en considération, la charge nucléaire de l'atome d'oxygène du groupe $(OH)_s$ est + 6.

Pour le groupe O_5H, nous n'avons tenu compte que des électrons de la liaison en utilisant les mêmes paramètres que pour O_1. Les intégrales à trois centres faisant intervenir des densités de charge centrées sur O_5 et H ont été négligées. Les paires d'électrons libres responsables des forces dues aux atomes O_1, O_2, O_3 et O_4, ont été décrites par des orbitales moléculaires hybrides sp^3.

Les charges Z_R et $Z_{R'}$ sont déterminées à partir des charges δ_3 et δ_4 des cations octaédriques (voir les formules 8). Les forces correspondantes sont :

$$FRH = \frac{Z_H \cdot Z_R}{(HR)^2} \cdot \frac{1}{\varepsilon_H} \text{ et } FR'H = \frac{Z_H \cdot Z_{R'}}{(HR')^2} \frac{1}{\varepsilon_H}$$

Le cation compensateur est assimilé à une charge ponctuelle. Il est à l'origine d'une force :

$$FCH = \frac{Z_C \cdot Z_H}{(CH)^2}$$

(Z_C est la charge du cation compensateur).

c) *Calcul numérique des paramètres.*

Le calcul est conduit de la façon suivante :

— une valeur est donnée aux variables ε_H, δ_3, δ_4, CO (cote du cation compensateur + 2,21 Å), θ ($\theta = \alpha_{12}$), OH (longueur de la liaison), β_2 et λ/μ.

— Les relations d'orthogonalité entre les orbitales φ_1, φ_2, φ_3 et φ_4 et les relations géométriques entre les angles α_{12}, α_{13} ($\alpha_{13} = \alpha_{14}$) permettent de calculer ε_b, ε_1, ε_3, ε_4 et les angles $\alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{34}, \beta_1$. La relation de normalisation de φ_1 est utilisée pour calculer λ et μ.

— Calcul des forces et de leur résultante.

— Recherche des valeurs des paramètres qui annulent cette résultante.

Étant donné leur simplicité, nous avons utilisé les orbitales atomiques données par SLATER (réf. cit. in PULLMAN, PULLMAN, 1952). Elles permettent de représenter la densité électronique avec une approximation convenable pour les atomes de la première ligne du tableau de la classification périodique (CLEMENTI et RAIMONDI, 1963). Leur utilisation soulève une difficulté car les paramètres d'une orbitale qui décrit un électron dans un atome isolé, ne sont pas les mêmes que pour des atomes engagés dans une liaison. Certaines relations ont été proposées pour calculer les constantes d'écran relatives à l'atome lié, mais leur utilisation nécessite la connaissance des diagrammes de corrélation (MUSULIN, 1956). Étant donné, d'une part, que nous n'avons pas de renseignements au sujet du groupe $(OH)^-$, que d'autre part nous procédons par analogie avec un modèle utilisé pour la molécule d'eau, nous admettons que l'atome d'oxygène peut être décrit par les orbitales de l'atome isolé (BADER et JONES, 1963). Par contre, cette approximation n'est pas possible pour l'atome d'hydrogène car le champ électrique de l'atome d'oxygène déforme beaucoup trop la distribution spatiale de l'électron. Nous prendrons alors la valeur 1,32 pour la constante d'écran relative à l'orbitale (1*s*) de l'atome d'hydrogène (BADER, JONES, 1963).

Les orbitales atomiques de SLATER ont pour expression :

$$\chi(n, l, m) = N_n \exp(-ar) \cdot r^{(n-1)} \cdot \theta_l^m (\cos\theta)\, \Phi_m(\varphi)$$

avec θ_l^m : polynôme de Legendre associé.

$$\Phi_0(\varphi) = (2\pi)^{-1/2} \qquad \text{et} \qquad \Phi_m(\varphi) = \pi^{-1/2} (\sin m\varphi \text{ ou } \cos m\varphi)$$

$$N_n = \frac{(2a)^{(n+1/2)}}{(2n!)^{1/2}}$$

n, l, m : nombres quantiques.
a : constante d'écran.

L'orbitale (2*s*)′ de l'oxygène est rendue orthogonale à (1*s*), soit :

$$(2s) = 1{,}028\,41\big((2s)' - 0{,}233\,45(1s)\big)$$

Les pas de variation utilisés sont les suivants : $\varepsilon_H = 1$; δ_3 et $\delta_4 = 0{,}5$; CO = 1 u.a. ; $\theta = 4^\circ$; OH = 0,01 u.a ; $\beta_2 = 10^\circ$; $\lambda/\mu = 0{,}1$.

Ce calcul a été réalisé à l'aide d'un programme écrit en FORTRAN V pour un ordinateur Univac 1108.

Les valeurs suivantes situent l'importance relative des forces qui agissent sur le noyau de l'atome d'hydrogène.

Paramètres : CO = 5 u.a. ; OH = 1,85 u.a. ; $\theta = 114^\circ$; $\varepsilon_b = 42{,}03^\circ$; $\varepsilon_1 = 66{,}26^\circ$; $\varepsilon_3 = 64{,}27^\circ$.

Force due à OH (φ_1 et φ_2)	composante x =	0,888 70 u.a.
	composante z =	0,449 10 u.a.
Force due à OH (φ_3 et φ_4)	composante x =	0,741 65 u.a.
	composante z =	0,276 78 u.a.
Force due au cation compensateur	composante x =	— 0,007 84 u.a.
	composante z =	— 0,026 69 u.a.
Force due au 2e OH	composante x =	0,028 71 u.a.
	composante z =	0,020 47 u.a.
Force due aux atomes d'oxygène octaédriques	composante x =	— 0,043 02 u.a.
	composante z =	— 0,025 88 u.a.

Les tableaux A 2 et A 3 donnent des exemples de valeurs trouvées.

TABLEAU A 2

Influence de la charge q_{OH} *sur les valeurs des paramètres du groupe OH.*

	$\delta_3 = +1$; $\delta_4 = +1{,}5$ $q_{OH} = -0{,}58$	$\delta_3 = +1{,}5$; $\delta_4 = +2{,}25$ $q_{OH} = -0{,}79$	$\delta_3 = +2$; $\delta_4 = +3$ $q_{OH} = -1$
OH (u.a.)	1,93 (1)	1,93 (1)	1,85
ε_b	43,75°	42,71°	42,03°
ε_l	68,66°	66,26°	66,26°
$\varepsilon_3 = \varepsilon_4$	62,24°	64,27°	64,27°
λ/μ	0,8	0,7	0,7
θ	110°	114°	114°

(1) Ces valeurs correspondent à $\varepsilon_H = 2$ et à la distance CO = 5 u.a. CO est la distance qui sépare le cation compensateur du groupe OH : CO = (CP + 4,18) u.a.

TABLEAU A 3

Influence de la distance CO sur les valeurs des paramètres du groupe OH.

CO u.a.	4	5	6	7	8	9	10
OH (u.a.) ..	2,00	1,85	1,84	1,84	1,84	1,84	1,83
θ	114°	114°	114°	114°	110°	110°	114°
λ/μ	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
ε_b	42,57°	42,03°	41,94°	41,94°	42,19°	42,19°	41,85°
ε_l	66,26°	66,26°	66,26°	66,26°	68,66°	68,66°	66,26°
ε_3	64,27°	64,27°	64,27°	64,27°	62,24°	62,24°	62,24°

Ces valeurs correspondent à $q_{OH} = -1$.

Rappelons que nous avons effectué le calcul des paramètres du groupe OH pour le groupe de symétrie de la maille : C_2/m. Pour le groupe de symétrie C_2, l'atome d'oxygène O_3 et le groupe $(OH)_5$ doivent être permutés (fig. A 2). Les attractions dues à O_3 et à l'oxygène de $(OH)_5$ sont aussi permutées, mais étant donné leur similitude cela n'entraîne pas un changement notable de ΣF (pour déterminer la force due à $(OH)_5$ nous n'avons pas tenu compte des paires d'électrons libres de ce groupe et les valeurs des forces dues aux électrons du groupe $(OH)_s$ sont bien plus grandes que celles dues aux atomes d'oxygène O_1, O_2, O_3, O_5 et au groupe $(OH)_5$). Le changement essentiel est donc celui de la position de l'atome d'hydrogène de $(OH)_5$ qui se trouve rapproché de $(OH)_s$. Il en résulte une répulsion plus grande sur l'hydrogène de $(OH)_s$ que dans le groupe de symétrie C_2/m. Toutefois, cette variation de répulsion est faible étant donné les valeurs des distances entre les atomes d'hydrogène, et reste très petite vis-à-vis des autres forces. En conséquence, nous considérons que la description du groupe OH est la même dans les deux groupes de symétrie pour l'usage que nous voulons en faire, c'est-à-dire, calculer le champ électrique dû à OH dans l'espace interlamellaire, donc à des distances assez grandes. Cette attitude doit être évidemment plus nuancée en ce qui concerne les propriétés spectroscopiques du groupe OH.

C. — *Calcul de l'énergie WOH*

$$WOH = E_R + E_{OH}$$

E_R correspond aux charges Z_R et $Z_{R'}$, et E_{OH} à (OH). Pour E_R nous avons :

$$E_R = \left(\frac{Z_R}{CR} + \frac{Z_{R'}}{CR'}\right) \cdot \frac{Z_C}{\varepsilon_H}$$

où : Z_C = charge du cation compensateur
CR, CR' = distances entre les centres R et R' des octaèdres I et II (fig. A 2) et le cation compensateur.

Le calcul précédent donne les expressions des orbitales moléculaires relatives au groupe OH. Elles permettent de décrire la densité de charge de OH, et donc de calculer l'énergie d'interaction avec le cation compensateur par application de la méthode suivante :

Soit φ_B une orbitale centrée sur B (fig. A 5). L'énergie d'interaction entre une charge Z_A située en A et la distribution de charge $|\varphi_B|^2$ centrée sur B est :

$$E = -Z_A \int_v \frac{|\varphi_B|^2}{r_A}\, dv$$

Supposons par exemple, que φ_B soit une orbitale hybride *sp* telle que $p\sigma$ soit dirigée suivant AB.

$$\varphi_B = \alpha(2s) + \beta(2p\sigma)$$

On a :

$$E = -Z_A \int_v \frac{|\varphi_\beta|^2}{r_A}\, dv = -Z_A \left[\alpha^2 \int_v \frac{(2s)^2}{r_A}\, dv + \beta^2 \int_v \frac{(2p\sigma)^2}{r_A}\, dv + 2\alpha\beta \int_v \frac{(2s)\ (2p\sigma)}{r_A}\, dv \right].$$

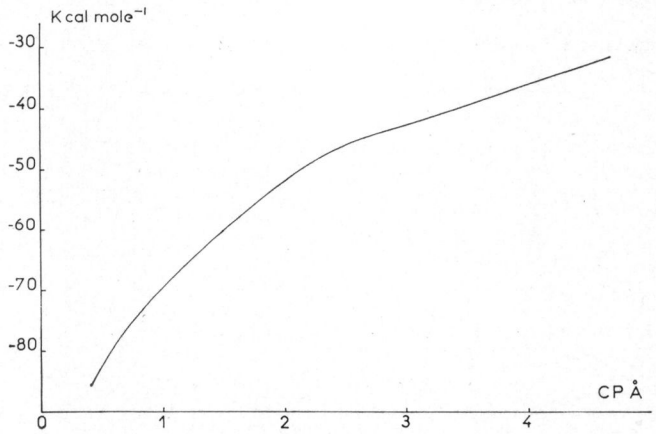


FIG. A 7. — *Énergie d'un cation compensateur dans le champ électrique dû à une substitution isomorphique : WOH*

Les intégrales sont évaluées à l'aide des formules données par ROOTHAAN (1951).

Toutes les intégrales pour lesquelles la distribution de charge $\varphi_B\varphi_{B'}$ n'appartient pas à l'espèce de symétrie Σ sont nulles.

L'énergie totale correspondante est :

$$E_T = E + \frac{Z_A \cdot Z_B}{AB}$$

L'énergie d'interaction E_{OH} entre le groupe OH et le cation compensateur est calculée de cette façon en utilisant les orbitales φ_i qui décrivent le groupe OH.

Les valeurs des énergies WOH utilisées lors de l'étude de l'hydratation sont données par le graphique de la figure A 7. Elles correspondent aux cas où $\delta_3 = +2$ et $\delta_4 = +3$. Dans ce cas E_R est nulle car $Z_R = -Z_{R'}$ (tabl. A 1) et il n'est pas nécessaire de connaître ε_H.

ANNEXE III

CALCUL DE L'ÉNERGIE D'INTERACTION ENTRE LES ATOMES D'OXYGÈNE DE LA SURFACE ET LE CATION COMPENSATEUR

Nous supposerons que les deux paires d'électrons libres d'un atome d'oxygène peuvent être décrites par deux orbitales hybrides équivalentes de la forme :

$$\Phi l_1 = \cos\varepsilon\,(2s) + \sin\varepsilon(2p_1)$$
$$\Phi l_2 = \cos\varepsilon\,(2s) + \sin\varepsilon(2p_2)$$

ε détermine l'état d'hydridation, $2p_1$ et $2p_2$ représentent les directions associées aux paires l_1 et l_2. Soit β l'angle fait par ces deux directions (fig. A 8). L'orthogonalité entre Φl_1 et Φl_2 conduit à la relation :

$$\operatorname{cotg}^2\varepsilon = -\cos\beta$$

L'énergie d'interaction avec les atomes d'oxygène représente une contribution à l'énergie potentielle totale du cation compensateur. Elle doit être en accord avec la position d'équilibre de celui-ci (représentée par la valeur de la cote CP) et pour cela, il nous faudra trouver la valeur convenable de ε, donc de β.

Dans le cadre du modèle que nous avons défini, l'expression de l'énergie d'interaction entre un atome d'oxygène et un cation de charge Z_C situé en C est :

$$E = -4Z_C\Big[\cos^2\varepsilon\,A(2s) + \sin^2\varepsilon\,[(A_1^2 + A_2^2)\,A(2p) + (B_1^2 + B_2^2 + C_1^2 + C_2^2)\,A(2\,pi)] + 2\sin\varepsilon\cos\varepsilon\,(A_1 + A_2)\,A(2sp)\Big] + \frac{Z_C \cdot Z_O}{CO}$$

Avec :

$$A_1 = \cos\omega\sin\varphi\sin\beta/2 + \sin\omega\cos\beta/2$$
$$A_2 = -\cos\omega\sin\varphi\sin\beta/2 + \sin\omega\cos\beta/2$$
$$B_1 = -\sin\omega\sin\varphi\sin\beta/2 + \cos\omega\cos\beta/2$$
$$B_2 = \sin\omega\sin\varphi\sin\beta/2 + \cos\omega\cos\beta/2$$
$$C_1 = \cos\varphi\sin\beta/2$$
$$C_2 = -\cos\varphi\sin\beta/2$$
$$Z_O = +4$$

$$A(2s) = \int_v \frac{(2s)^2}{r_A}\,dv\,; \qquad A(2p) = \int_v \frac{(2p\sigma)^2}{r_A}\,dv$$

$$A(2pi) = \int_v \frac{(2p\pi)^2}{r_A}\,dv\,; \qquad A(2sp) = \int_v \frac{(2s)\,(2p\sigma)}{r_A}\,dv$$

r_A se rapporte au centre C et les orbitales atomiques sont centrées sur O.

Les cas particuliers étudiés sont les suivants :

— Cavité H : $\varphi = \pi/2$,
— Cavité T : $\varphi = 0$,
— Groupe P : atome central P, $\varphi = 0$; 4 atomes $\varphi = \pm\pi/6$.

Le calcul du champ électrique en C est analogue à celui des forces.

Les valeurs des énergies utilisées dans les chapitres I et II correspondent à $\beta = 93{,}30^0$ et sont données par les graphiques suivants en fonction de CP.

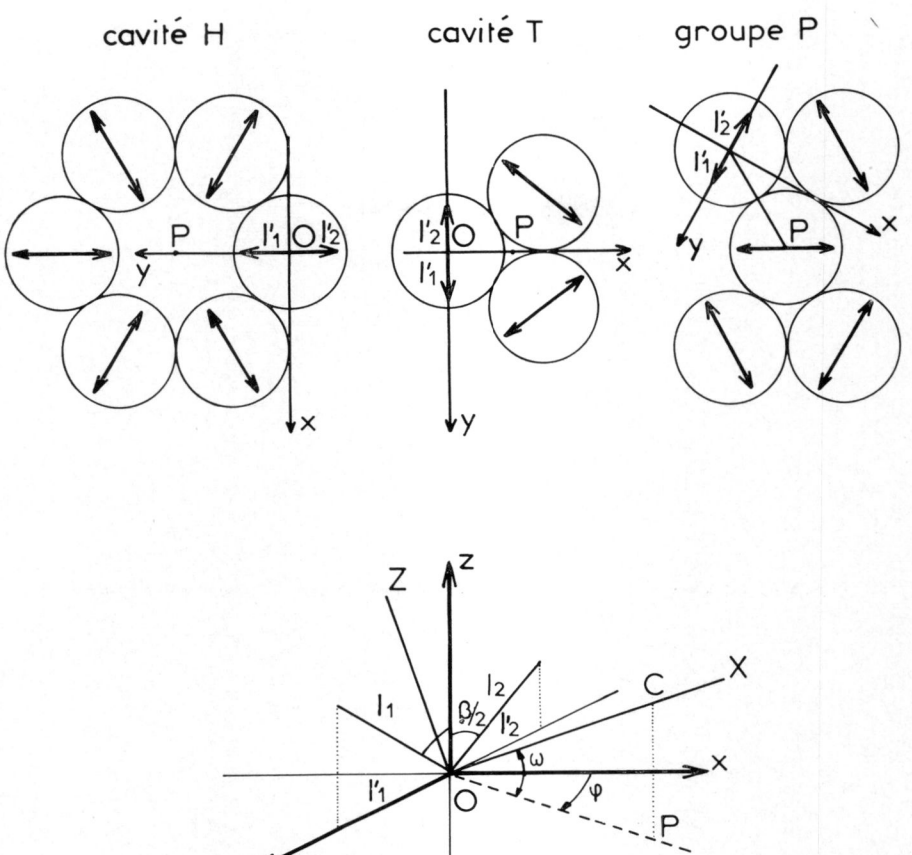


FIG. A 8. — *Système de coordonnées utilisé pour calculer l'énergie du cation compensateur dans le champ électrique des atomes d'oxygène de la surface*

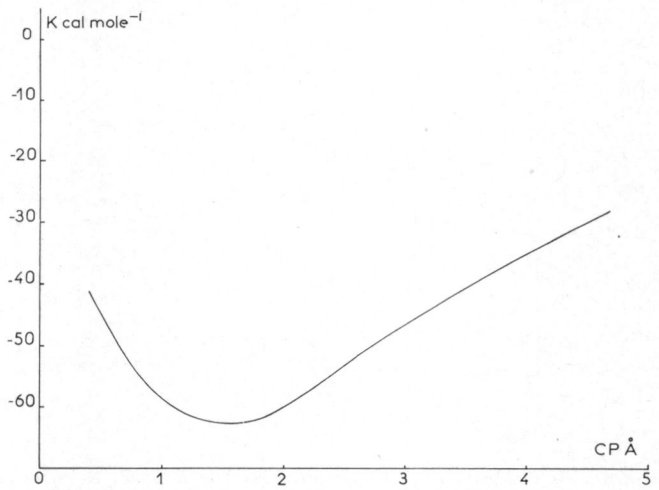


FIG. A 9. — *Énergie d'un cation compensateur dans le champ électrique d'une cavité H*

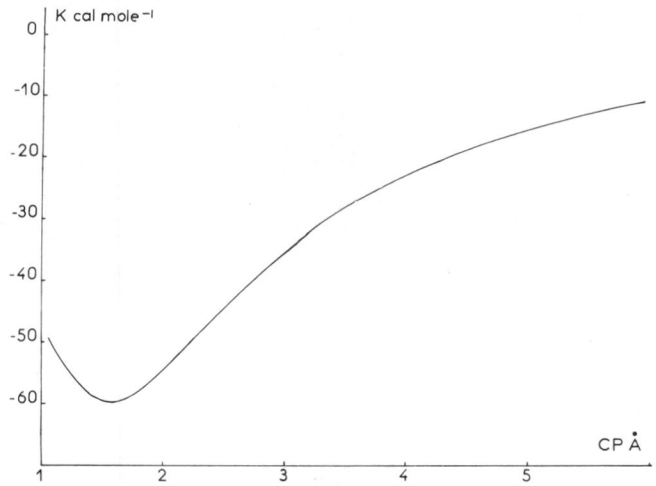


FIG. A 10. — *Énergie d'un cation compensateur dans le champ électrique d'une cavité T*

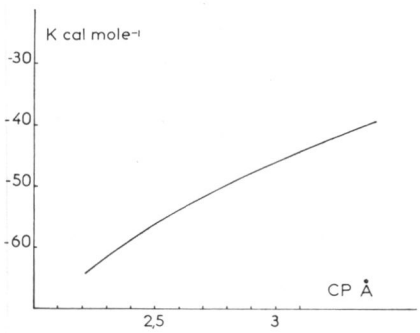


FIG. A 11. — *Énergie d'un cation compensateur dans le champ électrique d'un groupe P*

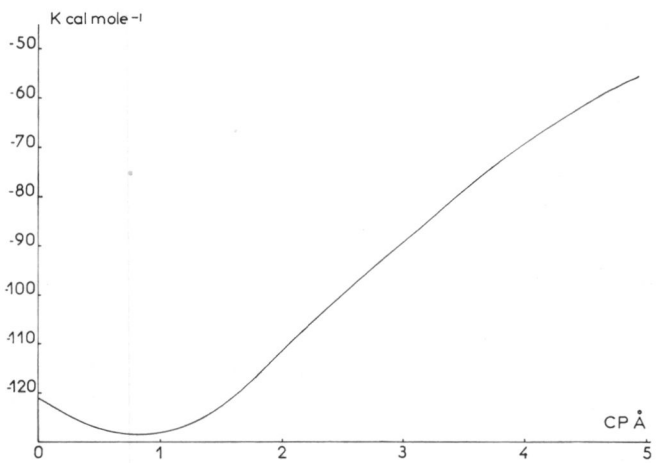


FIG. A 12. — *Énergie d'un cation compensateur dans le champ électrique total dû à une substitution isomorphique et à une cavité H*

figure A 9 : énergie du cation dans le champ électrique d'une cavité H
figure A 10 : — — — — — T
figure A 11 : — — — — d'un groupe P

Enfin, la figure A 12 représente l'énergie WFI d'un cation dans le champ électrique dû à la charge résultant d'une substitution isomorphique et aux atomes d'oxygène d'une cavité H. L'énergie, WFS est, elle, représentée par la figure A 10 dans le mode de superposition des feuillets défini au chapitre 1.

ANNEXE IV

CALCULS RELATIFS AUX INTERACTIONS DUES AUX MOLÉCULES D'EAU

A. — *Interactions cation-eau*

1. *Potentiel dû à la molécule d'eau.*

L'expression du potentiel V est la suivante :

$$V = \frac{\mu \cos\theta}{r^2} + \frac{1}{2r^3}\left[(Q_{zz} - Q_{xx})(1 - 3\sin^2\theta\cos^2\varphi) + (Q_{zz} - Q_{yy})(1 - 3\sin^2\theta\sin^2\varphi)\right]$$

$$+ \frac{1}{2r^4}\left[(R_{zzz} - 3R_{zxx})(\cos\theta - 5\sin^2\theta\cos^2\varphi\cos\theta) + (R_{zzz} - R_{zyy})(\cos\theta - 5\sin^2\theta\sin^2\varphi\cos\theta)\right]$$

μ : moment dipolaire
Q_{xx}, Q_{yy}, Q_{zz} : composantes du moment quadripolaire
R_{zxx}, R_{zyy}, R_{zzz} : composantes du moment octupolaire.

Les angles θ et φ sont définis dans la figure 16 (chap. 1). Les valeurs des composantes des moments sont données dans le paragraphe III A du chapitre 1.

2. *Énergie d'interaction entre le cation et les moments induits dans la molécule d'eau.*

Nous n'envisagerons que les moments dipolaires induits par le cation et par le réseau. Rappelons que la molécule d'eau peut être considérée comme une sphère polarisable isotrope, de polarisabilité moyenne $\alpha = 1{,}444\ 10^{-24}$ cm^3.

L'énergie des moments dipolaires induits dans le champ électrique du cation est :

$$W_m = \frac{Zc}{r^2}\left[-\mu_C + \mu_R \cos\widehat{(\vec{r}, \vec{\mu}_R)}\right]$$

avec : r = distance entre le cation et la molécule d'eau
μ_C = moment dipolaire induit par le cation
μ_R = moment dipolaire induit par le réseau dû essentiellement au champ électrique E_R des atomes d'oxygène de la surface.

L'énergie de polarisation est : par le cation $\frac{\mu_C^2}{2\alpha}$, et par le réseau $\frac{\mu_R^2}{2\alpha}$.

3. *Énergie de dispersion et de répulsion.*

L'ordre de grandeur de l'énergie de dispersion peut être évalué à l'aide de la formule de LONDON (BUCKINGHAM, 1957 ; SALEM, 1965) :

$$U_{dis} = -\frac{3}{2} \bullet \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2} \bullet \frac{\alpha_1 \alpha_2}{r^6}$$

I_1, I_2, α_1, α_2, sont les potentiels d'ionisation et les polarisabilités du cation et de la molécule d'eau.

U_{dis} est faible : 0,1 kcal mole^{-1} pour Li^+ ; 0,5 kcal mole^{-1} pour Cs^+.

Quand les nuages électroniques du cation et de la molécule d'eau commencent à se recouvrir, une force de répulsion apparaît. Il existe peu de descriptions de ce genre de force. Très souvent, le problème est simplifié par l'utilisation du modèle des sphères rigides (BUCKINGHAM, 1957) : a_c étant le rayon cristallographique du cation, a_m le rayon de la modécule d'eau, la variation de l'énergie de répulsion en fonction de la distance de séparation r est :

$$\begin{aligned} U(r) &= \infty \qquad r < a_c + a_m \\ U(r) &= 0 \qquad r \geqslant a_c + a_m \end{aligned}$$

Cependant, nous avons tenté d'estimer sur un exemple l'importance de cette approximation. Pour évaluer la force d'une liaison, l'étude du recouvrement des orbitales qui participent à la liaison fournit de précieuses indications (MULLIKEN, 1955 *a* ; MULLIKEN, 1955 *b*). Par analogie, l'étude du recouvrement de deux orbitales entièrement occupées doit permettre de prévoir l'importance des forces de répulsion. Nous avons donc calculé la valeur de l'intégrale de recouvrement entre l'orbitale $(1s)$ du cation Li^+ et une orbitale hybride sp^3 de l'oxygène φ_0, correspondant à une paire d'électrons libres

$$S = \int_v (1s)\ \varphi_0\ dv$$

Pour Li^+, nous avons utilisé une combinaison linéaire d'orbitales du type de SLATER (LÖWDIN, 1963) :

$$(1s) = 6{,}664\ 1 \exp(-2{,}434\ 6\ r) + 2{,}561\ 8 \exp(-4{,}425\ 0\ r)$$

Pour l'oxygène, nous avons utilisé les orbitales atomiques de SLATER. Les valeurs de S ont été obtenues à partir des tables de MULLIKEN *et al.* (1949), et sont données dans le tableau A 4.

Ces faibles valeurs de S peuvent justifier l'utilisation du modèle des sphères rigides (pour Li^+, la distance est de 4,15 u.a.).

TABLEAU A 4

Valeurs de l'intégrale de recouvrement S

Distance cation-oxygène (u.a.)	4	4,25	4,50	4,75	5,00
S	0,070 6	0,042 3	0,033 1	0,023 0	0,011 9

B. — *Interactions entre les molécules d'eau*

1. *Interactions électrostatiques.*

Nous les avons évaluées à l'aide d'un modèle dans lequel trois molécules d'eau sont disposées symétriquement par rapport à un cation (fig. A 13).

Le moment dipolaire total s'écrit pour la molécule 1 par exemple

$$\vec{\mathcal{M}}_1 = \vec{m}_1 + \vec{\mu}_e(1)\ 2 + \vec{\mu}_e(1)\ 3$$

où $\vec{m}_1$ = moment permanent + moment induit par le cation

$\vec{\mu}_e(1)\ 2$ et $\vec{\mu}_e(1)\ 3$: moments induits dans la molécule 1 par les molécules n° 2 et n° 3.

$$\vec{\mu}_e(1)\ 2 = \alpha \left[\frac{3\,\vec{\mathcal{M}}_2 \cdot \vec{D}_{12}}{(D_{12})^5} \cdot \vec{D}_{12} - \frac{\vec{\mathcal{M}}_2}{(D_{12})^3} \right], \text{ etc.}$$

L'énergie d'interaction entre les trois molécules s'exprime par la formule (BOTTCHER, 1952) :

$$\text{WIN} = -\frac{3}{D^5}(\vec{\mathcal{M}}_1 \cdot \vec{D}_{12})(\vec{\mathcal{M}}_2 \cdot \vec{D}_{12}) + \frac{\vec{\mathcal{M}}_1 \cdot \vec{\mathcal{M}}_2}{D^3} - \frac{3}{D^5}(\vec{\mathcal{M}}_1 \cdot \vec{D}_{13})$$

$$(\vec{\mathcal{M}}_3 \cdot \vec{D}_{13}) + \frac{\vec{\mathcal{M}}_1 \cdot \vec{\mathcal{M}}_3}{D^3} - \frac{3}{D^5}(\vec{\mathcal{M}}_2 \cdot \vec{D}_{23})(\vec{\mathcal{M}}_3 \cdot \vec{D}_{23}) + \frac{\vec{\mathcal{M}}_2 \cdot \vec{\mathcal{M}}_3}{D^3}$$

$$+ \frac{1}{2\alpha}[(\mu_e(1)_{23})^2 + (\mu_e(2)_{13})^2 + (\mu_e(3)_{12})^2]$$

$\mu_e\,(1)_{23}$: moment induit total dans 1 par 2 et 3
$D_{12} = D_{13} = D_{23} = D$: les trois molécules d'eau sont à la même distance du cation.

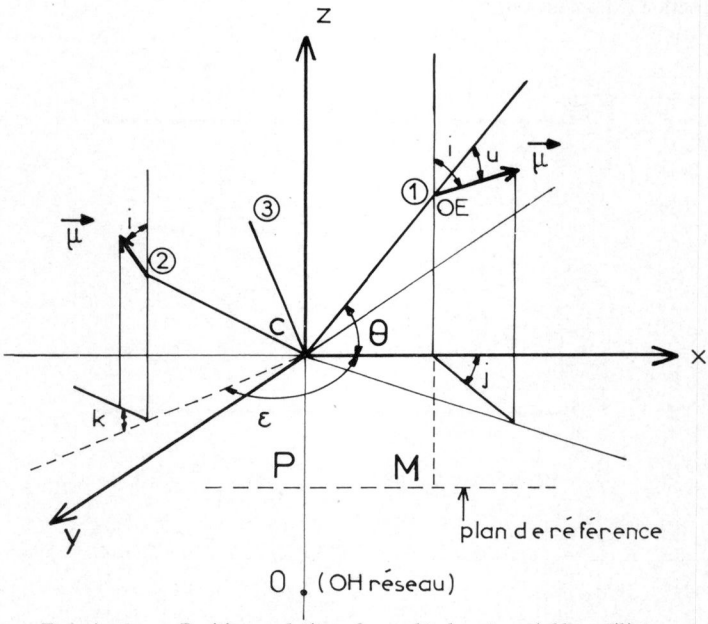


FIG. A 13. — *Positions relatives des molécules et variables utilisées pour calculer l'énergie d'interaction entre les molécules d'eau (WIN)*

Les résultats montrent que très peu d'orientations correspondent à des états attractifs. La position du cation (CO ou CP) intervient à la fois sur la grandeur du moment dipolaire total et sur son orientation. C'est pour les positions éloignées du cation que s'obtiennent les états les plus stables. Cependant, l'énergie d'attraction est toujours faible (de l'ordre de 3-4 kcal mole^{-1}). Les états répulsifs sont les plus fréquents. Si cette énergie d'interaction était la seule à déterminer les paramètres du système, les molécules d'eau se placeraient le plus loin possible du cation et s'orienteraient avec des angles : $\widehat{j} \simeq 90^o$, $\widehat{i} \simeq 100^o$. Quand $\widehat{j} = -\widehat{k}$, la symétrie C_3 est supprimée et tous les états sont répulsifs. Dans ce cas, l'énergie WIN est moins sensible aux variations de position et d'orientation.

2. *Interactions de répulsion et de dispersion.*

En utilisant les valeurs numériques du deuxième coefficient du viriel (coefficient B dans la formule $Pv/RT = 1 + B/v + ...$), MARGENEAU et MYERS (1944) ont proposé l'expression suivante :

$$\text{U répulsion} + \text{U dispersion} = 3{,}25\ 10^{-9} \exp\left(-\frac{R\ 10^8}{0{,}28}\right) - \left(\frac{45.10^{-60}}{R^6} + \frac{95.10^{-76}}{R^8}\right)$$

où R, distance intermoléculaire, est exprimée en Å et les énergies en ergs.

La plus petite valeur de R que nous rencontrerons est R = 3,15 Å. Pour celle-ci :

U répulsion = + 0,58 kcal mole^{-1}
U dispersion = — 0,80 kcal mole^{-1}

Ces interactions sont faibles et nous les négligerons par la suite.

C. — *Interactions entre le réseau et les molécules d'eau*

1. *Interactions électrostatiques.*

a) *Interactions avec les atomes d'oxygène de la surface.*

α) Interactions dipolaires (fig. A 14).

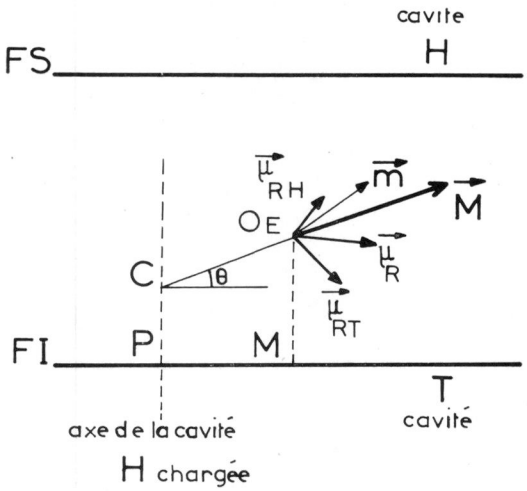


FIG. A 14. — *Composantes du moment dipolaire total de la molécule d'eau*

Le moment dipolaire total de la molécule d'eau est : $\vec{M} = \vec{m} + \vec{\mu_R}$ avec :

$\vec{m} = \vec{\mu}$ (moment permanent) $+ \vec{\mu_c}$ (moment induit par le cation)
$\vec{\mu_R} = \vec{\mu}_{RH}$ (moment induit par la cavité H) $+ \vec{\mu}_{RT}$ (moment induit par la cavité T)

Précédemment, nous avions introduit le moment dipolaire induit $\vec{\mu_R}$ par le champ électrique $\vec{E_R}$. Quand une molécule d'eau est voisine d'un cation, elle se trouve près d'une cavité T sur FI et d'une cavité H sur FS (FI et FS désignent les deux surfaces qui limitent l'espace interlamellaire. Les cavités T et H sont définies sur la figure 10 du chapitre 1).

La cavité H est à l'origine d'un champ électrique $\vec{E}_H$ et la cavité T d'un champ électrique $\vec{E}_T$:

$$\vec{E}_R = \vec{E}_H + \vec{E}_T$$

La méthode de calcul de E_H et E_T est donnée dans l'annexe II.

L'énergie d'interaction avec le réseau est :

$$WEN = -\vec{M} \cdot \vec{E}_R + \frac{\mu_R^2}{2\alpha}$$

β) Interaction quadripolaire (fig. A 15).

Bien que l'énergie correspondante soit assez faible (de l'ordre de 1 kcal mole^{-1}), ce type d'interaction peut jouer un rôle important dans la détermination de l'orientation de la molécule d'eau.

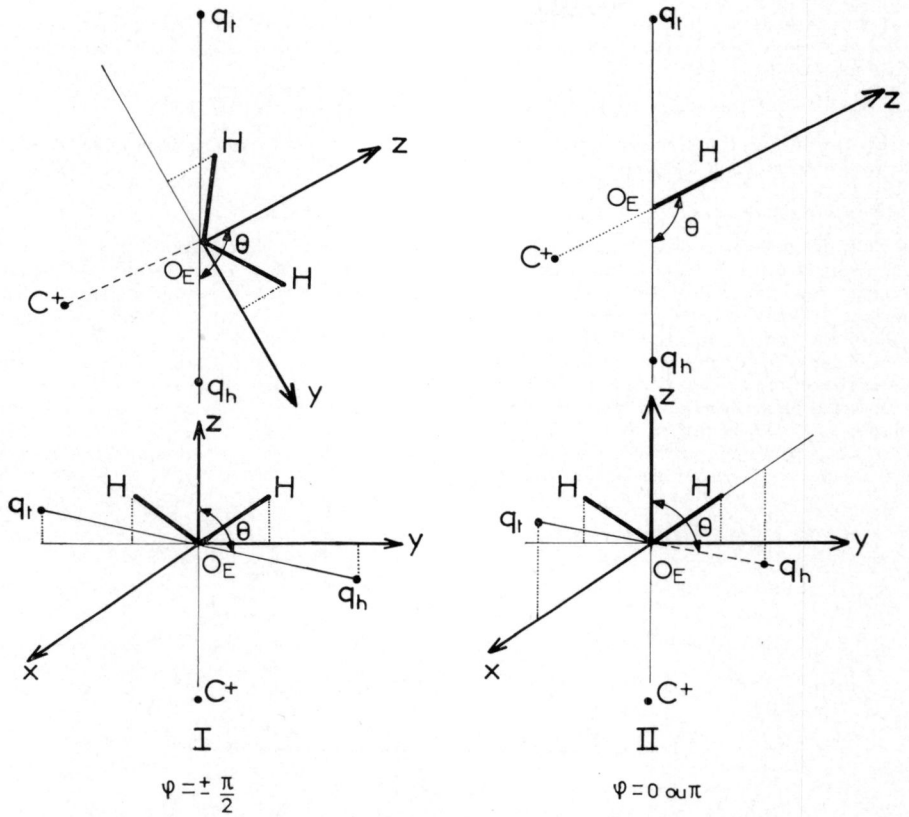


FIG. A 15. — *Orientations de la molécule d'eau par rapport au feuillet*

Étant donné que nous n'examinerons cet aspect que très sommairement, nous admettrons que le champ électrique dû en réalité aux paires d'électrons libres ($\overrightarrow{E_R} = \overrightarrow{E_H} + \overrightarrow{E_T}$) des cavités H et T, est dû à des charges q_H et q_T (< 0) situées au centre de ces cavités.

L'énergie d'un quadripôle de composantes Q_{xx}, Q_{yy}, Q_{zz}, situé à une distance r d'une charge q est (BÖTCHER, 1952) :

$$W_Q = \frac{1}{2} q \left[Q_{xx} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{1}{r}\right) + Q_{yy} \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(\frac{1}{r}\right) + Q_{zz} \cdot \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{1}{r}\right) \right]$$

En tenant compte des notations de la figure 16 et des valeurs des composantes données au paragraphe III A du chapitre 1, on a :

$$W_Q = \frac{q}{2r^3} (0{,}28 - 2{,}49 \sin^2 \theta) \; 10^{-26} \text{ erg} \qquad \text{pour} \qquad \varphi = 0 \text{ ou } \pi$$

$$W_Q = \frac{q}{2r^3} (0{,}28 + 1{,}65 \sin^2 \theta) \; 10^{-26} \text{ erg} \qquad \text{pour} \qquad \varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$

(r est en cm, q en u.e.s.)

Considérons le cas simple où l'axe C_2 de la molécule d'eau est aligné avec la direction cation-

oxygène. En réalité, l'alignement n'est jamais réalisé, mais nous verrons que l'écart est toujours faible. Deux orientations extrêmes sont possibles et elles correspondent à $\varphi = 0$ ou π (II) et $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ (I).

Quand $\varphi = 0$ ou π, W_Q est négatif si $\theta < 20^\circ$ ou $\theta > 160^\circ$.

Les positions d'équilibre des cations que nous déterminerons au paragraphe suivant conduisent toutes à des valeurs de θ comprises entre 20° et 160°. Par conséquent, W_Q sera toujours positif dans ce cas.

Quand $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$, W_Q est toujours négatif quelle que soit la valeur de θ.

En conclusion, l'interaction entre le réseau et le moment quadripolaire de la molécule d'eau favorise les orientation du type I.

b) *Interactions avec la charge résultant d'une substitution isomorphique.*

Pour des molécules d'eau situées dans l'espace interlamellaire, la charge du groupe OH du réseau peut être traitée comme une charge ponctuelle (située à 2,21 Å au-dessous du plan de référence). Soit une molécule d'eau tangente à un cation Na^+. L'énergie correspondante est une répulsion et l'orientation de la molécule la plus défavorable est celle pour laquelle le moment dipolaire est dans la direction (OH) réseau-(H_2O). En introduisant les effets d'écran du cation et des atomes d'oxygène de la surface, l'énergie trouvée est de + 1,4 kcal mole^{-1} (l'effet d'écran pour le cation est calculé comme pour l'oxygène, voir annexe VI). Cette valeur est surestimée car l'orientation réelle est différente de celle utilisée dans cet exemple. Dans les mêmes conditions, l'énergie est de 0,9 kcal mole^{-1} pour le potassium.

Par la suite, nous ne tiendrons pas compte de cette énergie et par conséquent, les énergies des molécules d'eau seront légèrement surestimées.

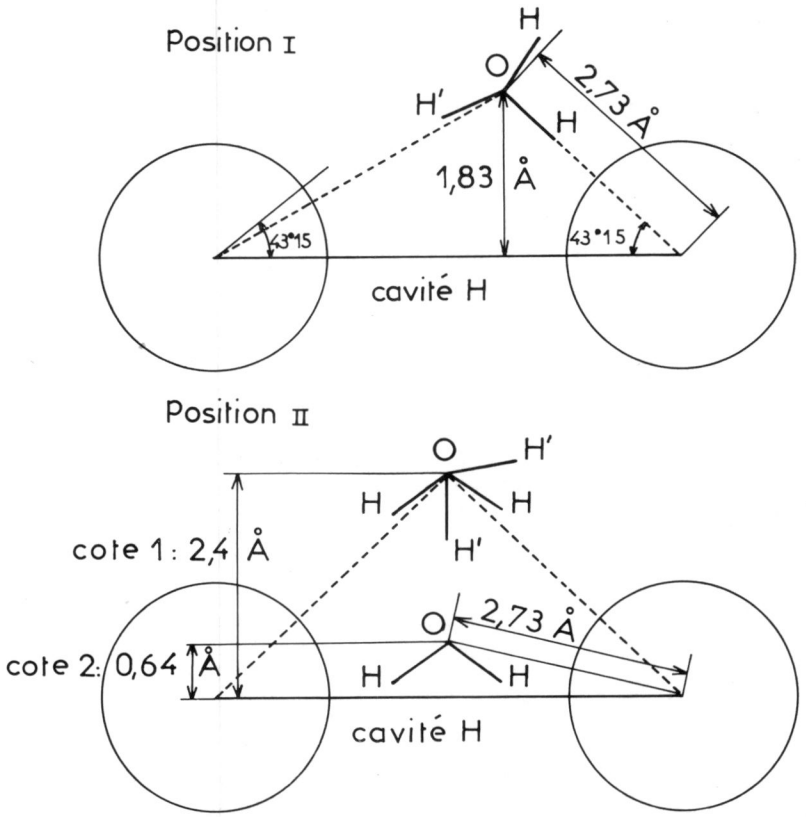


FIG. A 16. — *Liaisons hydrogène entre une molécule d'eau et les atomes d'oxygène de la surface dont les centres sont désignés dans le texte par* O'

2. *Liaisons hydrogène avec les atomes d'oxygène de la surface du réseau* (fig. A 16).

Plusieurs positions sont possibles :

Position I	orientation HOH — énergie de la liaison OHO′	6,09	kcal	mole^{-1}
	orientation H′OH — énergie des 2 liaisons OHO′ et OH′O′ ..	7,9	—	
Position II	cote 1 : orientation HOH — énergie des 2 liaisons OHO′....	4,5	—	
	cote 1 : orientation H′OH′ — énergie de liaisons	0	—	
	cote 2 orientation HOH — énergie de liaison	0	—	

En tenant compte du champ électrique des atomes d'oxygène de la surface, deux positions stables peuvent être définies. Elles sont indiquées au paragraphe III A du chapitre 1.

D. — *Étude d'un modèle*

Au cours de l'hydratation, l'argile passe par un état pour lequel l'écartement des feuillets est voisin du diamètre moléculaire de l'eau ($\simeq$ 3,2 Å, état 1). L'arrangement des molécules d'eau dans l'espace interlamellaire se fait donc essentiellement dans deux dimensions. Compte tenu du mode de répartition des cations, il peut se faire de plusieurs façons permettant ainsi la réalisation de nombreuses configurations. Cependant, une analyse théorique quelque peu détaillée n'est possible que si elle est effectuée sur un système simple, d'où la nécessité de définir un modèle.

A cet effet, nous avons pris en considération un cation entouré par trois molécules d'eau (fig. A 13). Ce modèle tient compte des contraintes stériques et il permet de décrire une importante catégorie de molécules d'eau (voir le chapitre sur l'hydratation).

L'objectif de l'étude de ce modèle est double : définir l'état énergétique d'une molécule d'eau soumise au champ électrique du réseau, du cation et des autres molécules, obtenir la fonction d'énergie potentielle totale du cation compensateur dans un état hydraté.

1. *Calculs.*

Les différents termes énergétiques sont les suivants :

— Énergie d'interaction cation-eau : WH = 3 Wh

— Énergie potentielle totale du cation : WCA = WH
+ WR (WR = WFI + WFS)
+ Wrep (répulsion entre cations)

— Énergie d'interaction totale d'une molécule d'eau :

WE = Wh
+ WEN (énergie H_2O-réseau)
+ WIN (énergie H_2O-H_2O)

WFI s'obtient à partir du graphique A 12 en utilisant la cote CP désirée et WFS s'obtient à partir du graphique A 10 en utilisant la cote l-CP (l = 5,8 Å pour Na^+, ce qui correspond à d_{001} = 12,4 Å). Nous rappelons que WR représente l'énergie du cation compensateur dans le champ électrique des réseaux correspondant aux feuillets FI et FS qui délimitent l'espace interlamellaire.

La répulsion entre les cations est envisagée dans trois cas :

— Répulsion nulle : un cation sur la surface FI n'a pas de cation voisin situé sur la surface FS.

— Répulsion due à un cation voisin : Wrep (un cation voisin se trouve dans une cavité hexagonale située sur la surface FS à la distance D_1, voir la figure 6 du chapitre 1).

— Répulsion moyenne : Wrep $_m$. Elle est calculée en utilisant les mêmes définitions qu'au paragraphe I C. du chapitre 1. Étant donné l'effet d'écran des molécules d'eau, nous ne tiendrons compte que des cations situés dans les trois cavités hexagonales les plus proches sur la surface FS, le cation étudié étant sur la surface FI. On a Wrep $_m$ = 0,6 Wrep.

L'effet de la polarisation du cation sur l'énergie d'interaction cation-eau est négligeable.

Les données sont les suivantes :

— Pour H_2O : — les molécules sont disposées symétriquement autour du cation (fig. A 17);
— la cote O_EM ; 2 valeurs = 2,40 et 3,40 Å. Elles correspondent aux deux maxima de densité électronique attribués à l'eau dans l'espace interlamellaire (Pezerat et Mering, 1967);
— les propriétés électriques : voir paragraphe III A chapitre 1.

— Pour les cations : les rayons ioniques. Ce sont ceux donnés par GOLDSCHMIDT (réf. citée in PAULING, 1960). Nous avons choisi ces valeurs car elles conviennent le mieux pour ce genre de calcul (BASOLO et PEARSON, 1960 ; BUCKINGHAM, 1957).

Les variables sont : (fig. A 17) :

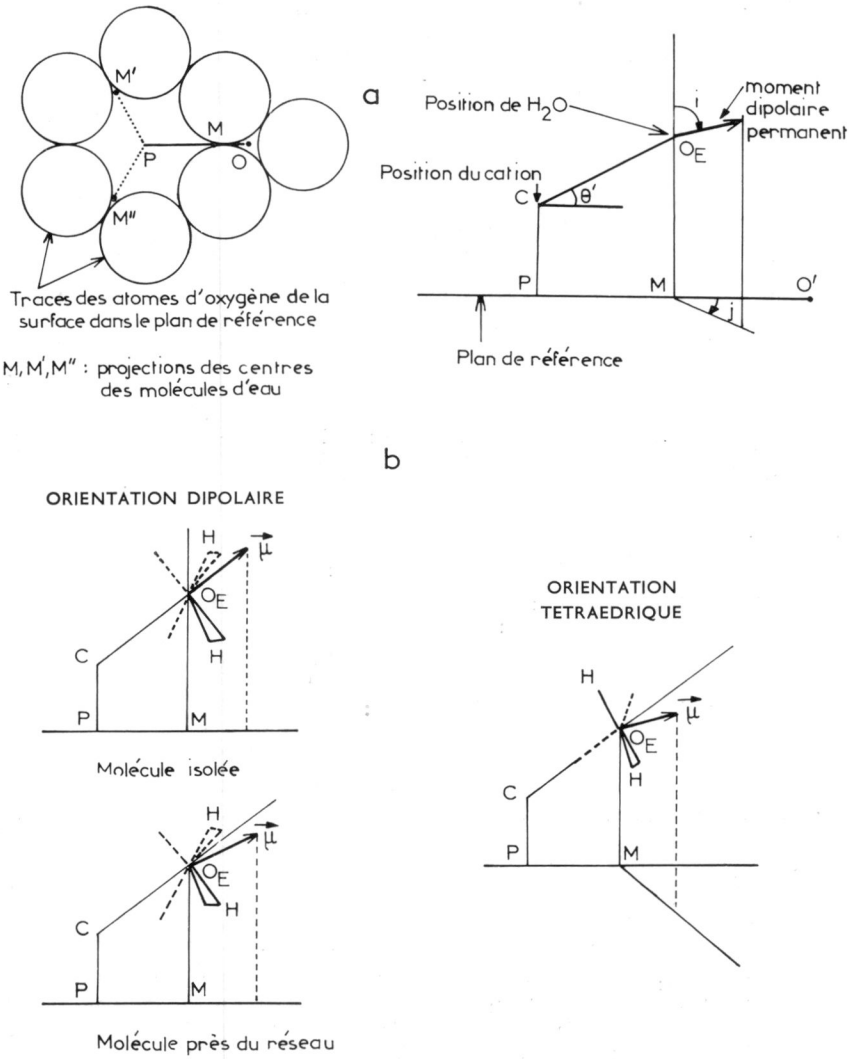


FIG. A 17. — a : *Variables utilisées dans la description du modèle représentant un cation hydraté*
b : *Orientation dipolaire et orientation tétraédrique*

— Pour H_2O : PM : distance entre la molécule d'eau et l'axe de la cavité H.

— Les angles $\widehat{i}$ et $\widehat{j}$. Ils déterminent l'orientation de l'axe C_2 de la molécule. Ils ne permettent pas de fixer complètement l'orientation de la molécule, car celle-ci peut tourner autour de cet axe. L'orientation définitive résulte de l'interaction avec les autres molécules d'eau (électrostatique et liaisons hydrogène), et de l'énergie du moment quadripolaire dans le champ du réseau (l'énergie du moment quadripolaire dans le champ du cation est comprise dans WH).

— Pour le cation : CP, cote par rapport au plan de référence.

2. *Résultats.*

a) *Cas du sodium.*

La position des molécules d'eau correspondant à l'état le plus stable est caractérisée par les valeurs suivantes :

— cote : O_EM = 2,40 Å,
— distance à l'axe de la cavité hexagonale : PM = 1,85 Å (les sphères rigides de la molécule et du cation sont tangentes).

L'étude de l'énergie d'interaction entre un cation et une molécule d'eau isolée montre que l'orientation la plus favorable est celle pour laquelle l'axe C_2 de la molécule est dans la direction cation-oxygène (orientation dipolaire représentée figure A 17). D'autres calculs ont d'ailleurs montré que la probabilité de cette orientation était voisine de 1 (SPOSITO, 1955). Cependant, quand la molécule d'eau est soumise à d'autres interactions, son orientation peut être différente. Ainsi, dans le cas du modèle que nous avons étudié, le champ électrique du réseau intervient et l'orientation la plus favorable correspond aux angles suivants :

$$\widehat{j} = 0 \qquad \widehat{i} = 63^\circ 9'$$

Quand l'action du réseau est négligée, l'angle $\widehat{i}$ vaut 51° 58'.

TABLEAU A 5

Valeurs de l'énergie potentielle des cations

CP Å	— 0,093	0,436	0,95	1,069	1,433	2,024	2,554
PM : Å	1,617	1,617	1,849	1,94	2,14	2,319	2,345
WFI + WFS	— 131,37	— 140,25	— 145,10	— 145,30	— 143,80	— 136,58	— 130,77
WH	— 40,56	— 59,49	— 77,77	— 79,21	— 82,71	— 85,27	— 87,14
WCA_0	— 171,93	— 199,74	— 222,87	— 224,51	— 226,51	— 221,85	— 217,91
$Wrep_m$	+ 29,95	+ 34,78	+ 40,89	+ 42,53	+ 48,07	+ 58,26	+ 66,06
WCA_m	— 141,98	— 164,96	— 181,98	— 181,98	— 178,44	— 163,59	— 151,85
Wrep	+ 49,92	+ 57,97	+ 68,15	+ 70,88	+ 80,12	+ 97,10	+ 110,10
WCA	— 122,01	— 141,77	— 154,92	— 153,63	— 146,39	— 124,75	— 107,81

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

Le tableau A 5 donne les différents termes énergétiques qui entrent dans la définition de l'énergie potentielle du cation compensateur :

WCA_0 = f(CP) : répulsion due aux cations voisins nulle (cation isolé)
WCA = f(CP) : répulsion due à un cation voisin
WCA_m = f(CP) : répulsion moyenne.

Les courbes correspondantes sont données dans les figures 24 *a*, *b* et *c* du chapitre 2.

Quand la montmorillonite est dans un état d'hydratation correspondant à l'état 1, la cote du cation sodium déterminée expérimentalement est 0,95 Å (PÉZÉRAT et MERING, 1967). Nous pouvons donc constater que le modèle étudié permet de retrouver la position du cation. Autrement dit, ce modèle introduit avec une approximation convenable les différents termes énergétiques qui déterminent la cote du cation.

b) *Résultats concernant tous les cations alcalins.*

Nous avons procédé aux mêmes calculs pour les cations Li^+, K^+, Rb^+ et Cs^+. Compte tenu des résultats obtenus pour le sodium, la cote de ces cations peut être déterminée. Les valeurs correspondantes sont données dans le tableau 13 du chapitre II.

E. — *Énergie d'interaction d'une molécule d'eau avec deux cations*

Nous venons d'effectuer le calcul complet de l'énergie d'interaction entre une molécule d'eau et un cation en tenant compte des autres molécules d'eau et du réseau. Cependant, un tel calcul est difficilement applicable à des situations plus compliquées, et pour celles-ci, nous avons choisi une analyse simplifiée. Elle tient compte des termes suivants :

— énergie (cation) — (moment dipolaire permanent) ..... W_p
— énergie (cation) — (moment dipolaire induit) ..... W_m
— énergie de polarisation ..... $W_{pol.}$

Ce calcul approché donne des résultats assez voisins de ceux obtenus avec le calcul complet, Dans cette évaluation, les cotes des cations correspondent aux positions d'équilibre (tabl. 13. chap. II), et la cote de la molécule d'eau est 2,40 Å.

1. *Deux cations sont voisins sur la surface FI* (fig. A 18).

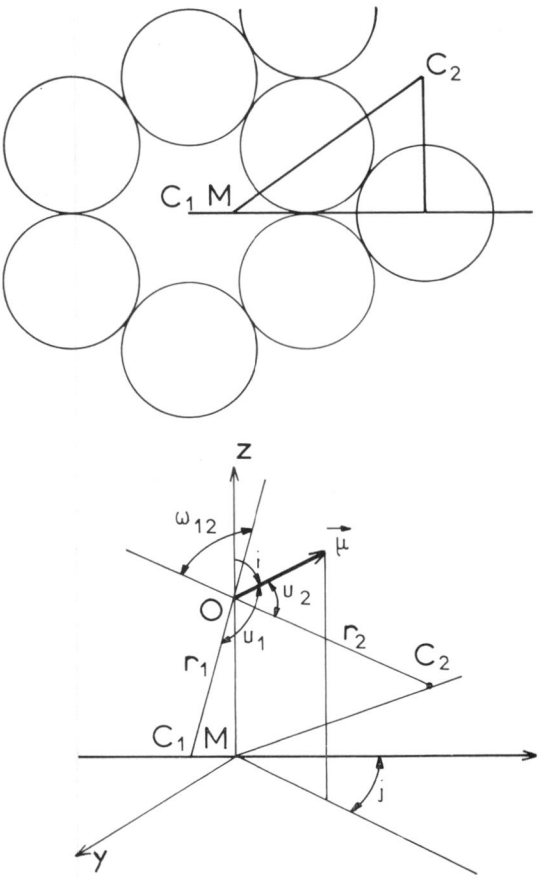


FIG. A 18. — *Positions relatives d'une molécule d'eau et de deux cations situés sur la surface FI* (molécule m_{IIb})

On a :

$$W_p = e \cdot \mu \left(\frac{\cos u_1}{r_1^2} + \frac{\cos u_2}{r_2^2} \right)$$

$$W_m = -\frac{e}{r_1^2} (\mu_{c_1} + \mu_{c_2} \cos \omega_{12}) - \frac{e}{r_2^2} (\mu_{c_2} + \mu_{c_1} \cos \omega_{12})$$

$$W_{pol.} = \frac{(\mu_{c_1})^2 + (\mu_{c_2})^2}{2\alpha}$$

μ est le moment dipolaire permanent, μ_{c_1} et μ_{c_2} sont les moments dipolaires induits par les cations C_1 et C_2, α est la polaisabilité, e la charge de l'électron.

Les valeurs des angles $\widehat{i}$ et $\widehat{j}$ correspondant aux énergies les plus grandes sont données par les solutions de

$$\frac{\partial |W_p|}{\partial j} = 0 \qquad \text{et} \qquad \frac{\partial |W_p|}{\partial i} = 0$$

La somme $\Sigma = W_p + W_m + W_{pol.}$, est l'énergie d'interaction totale de la molécule d'eau avec les deux cations C_1 et C_2, soit $\Sigma = W_{c_1} + W_{c_2}$.

La position la plus stable est celle pour laquelle la molécule d'eau est tangente soit au cation C_1, soit au cation C_2. Supposons que la molécule soit près du cation C_1. L'énergie (cation C_1)-(eau) est $W_{c_1} = A$; l'énergie (cation C_2) (eau) est $W_{c_2} = B$. Si la molécule est près de C_2, on a $W_{c_1} = B$ et $W_{c_2} = A$. Des énergies moyennes d'interaction peuvent alors être définies :

$$\overline{W}_{c_1} = p_1 A + p_2 B ; \qquad \overline{W}_{c_2} = p_1 B + p_2 A$$

p_1 et p_2 représentent les probabilités de trouver la molécule d'eau soit près du cation C_1, soit près du cation C_2.

Si les deux cations sont identiques

$$p_1 = p_2 = 0{,}5, \qquad \text{d'où} \qquad \overline{W}_{c_1} = \overline{W}_{c_2} = \overline{W}_c = \frac{A + B}{2}$$

Le tableau A 6 donne les valeurs de $\Sigma = A + B$ pour deux positions de la molécule d'eau : tangente au cation et dans l'axe de la cavité T (dans les deux cas la cote de la molécule est $O_E M = 2{,}40$ Å). Il donne également les valeurs de $\overline{W}_c$ pour le cas où la molécule est tangente au cation.

TABLEAU A 6

Énergies relatives aux molécules m_{IIa}

		Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
m_{IIa} Σ	tangente	— 30,9	— 26,0	— 20,0	— 18,0	— 16,4
	cavité T	— 17,0	— 19,3	— 17,2	— 17,2	— 16,4
W_c		— 15,5	— 13,0	— 10,0	— 9,0	— 8,2

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

2. *Deux cations sont voisins : l'un est situé sur la surface FI, l'autre sur la surface FS.*

Ce cas correspond aux deux types de molécules m_{Ib} (fig. A 19 *a*) et m_{IIb} (fig. A 19 *b*). Les énergies W_p, W_m et $W_{pol.}$ sont calculées de la même façon.

Pour les molécules m_{Ib}, la position la plus stable est en O ou O′, et l'énergie moyenne W_c

est définie comme précédemment. Avec les molécules m_{II_b}, il faut distinguer l'interaction avec C_1, W_{c_1}, qui correspond au type $m_{II_{bi}}$, de l'interaction avec C_2, W_{c_2}, qui correspond au type $m_{II_{bs}}$. (On a $\Sigma W_{c_1} + W_{c_2}$).

Le tableau A 7 donne les valeurs correspondantes.

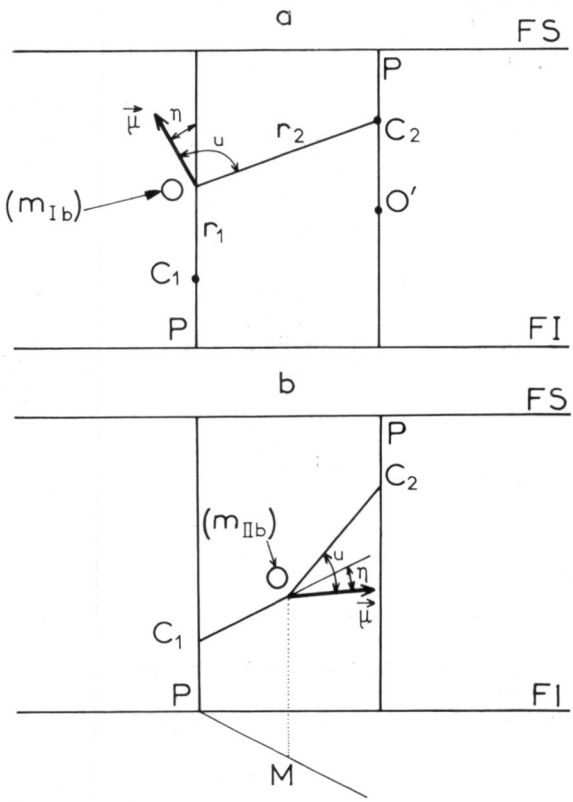


FIG. A 19. — *Positions relatives d'une molécule d'eau et de deux cations situés l'un sur la surface FI, l'autre sur la surface FS*
a : molécule m_{Ib}
b : molécule m_{IIb}

TABLEAU A 7

Énergies relatives aux molécules m_{I_b} et m_{II_b}

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
$\Sigma\, m_{Ib}$	— 30,2	— 20,3			
$\Sigma\, m_{IIb}$	— 33,11	— 26,2	— 21,2	— 19,9	— 24,7
$\overline{W_c}\, m_{Ib}$	— 15,1	— 10,2			
$W_{c1}\, m_{IIbi}$	— 32,0	— 26,1	— 20,3	— 15,1	— 15,1
$W_{c2}\, m_{IIbs}$	— 1,1	— 0,1	— 0,9	— 4,8	— 9,6

Les énergies sont exprimées en kcal $mole^{-1}$.

F. — *Influence des liaisons hydrogène sur l'énergie des molécules d'eau situées près d'un cation*

Le nombre de liaisons hydrogène susceptibles d'être contractées par une molécule d'eau située près d'un cation est au maximum de deux quand la molécule occupe une position repérée par $O_EM = 3{,}40$ Å, $PM = 2{,}40$ Å, et possède une orientation telle qu'une paire d'électrons libres de l'oxygène soit dirigée vers le cation. Appelons cette position, position tétraédrique (rappelons, voir figure A 17, que O_EM est la cote de la molécule par rapport au plan de référence, et PM est la distance à l'axe de la cavité chargée). Pour l'évaluation de l'énergie totale de cette molécule, il faut tenir compte de l'énergie due aux deux liaisons hydrogènes. Dans le meilleur des cas (distance entre atomes d'oxygène = 2,73 Å, orientation convenable des molécules), le gain d'énergie par liaison est de 6 kcal mole^{-1}. La stabilisation résultante est alors au maximum de 12 kcal mole^{-1}. Le tableau A 8 donne comparativement l'énergie totale d'interaction d'une molécule dans la position tétraédrique et d'une molécule dans la position dipolaire.

TABLEAU A 8

Influence des liaisons hydrogène sur l'énergie des molécules voisines des cations

	Li^+	Na^+	K^+	Rb^+	Cs^+
Énergie H_2O en position dipolaire (kcal mole^{-1})	— 38,8	— 31,9	— 22,7	— 18,8	— 14,5
Énergie H_2O en position tétraédrique (kcal mole^{-1})	— 7,5	— 6,8	— 6,8	— 7,1	— 7,9
Liaisons hydrogène (kcal mole^{-1})	— 12	— 12	— 12	— 12	— 12
Σ kcal mole^{-1}	— 19,5	— 18,8	— 18,8	— 19,1	— 19,9

Nous constatons que l'orientation « tétraédrique » (fig. A 17) peut être la meilleure avec le Césium si de fortes liaisons hydrogène s'établissent. Cette observation rejoint un certain nombre de conclusions relatives aux travaux effectués sur des solutions aqueuses d'électrolytes. Il apparaît en effet que les cations de petit rayon orientent les molécules d'eau de telle sorte que leur moment dipolaire permanent soit dans la direction cation-eau, alors que les cations de grand rayon (Rb^+, Cs^+) ont une action moins grande sur l'orientation (Haggis *et al.*, 1952 ; Harris et O'Konski, 1957 ; Hindman, 1962 ; Samoilov et Malenkov, 1967).

Nous pouvons donc considérer que la position dipolaire est la meilleure pour tous les cations. Ceci est vrai pour Li^+, Na^+, K^+, indifférent pour Rb^+ et peut entraîner une sous-estimation de l'énergie de la molécule avec Cs^+. Il faut cependant noter que l'énergie d'interaction de la molécule en position « tétraédrique » est la même pour tous les cations. Ceci signifie que les propriétés de l'eau adsorbée devraient être indépendantes de la nature des cations, ce qui est en contradiction avec les résultats expérimentaux.

ANNEXE V

DISTRIBUTION DES MOLÉCULES D'EAU

A. — *Ensembles de cations isolés sur la surface FI*
(voir la fig. 18, chap. 1)

Pour $n = 1$, il y a trois molécules du type m_{I_a} ; pour $n = 2$, il y a quatre molécules du type m_{I_a} et une du type m_{II_a}, etc.

Étant donné leur faible probabilité, nous ne tenons pas compte des ensembles isolés de trois cations et plus.

B. — *Des cations sur la surface FS sont voisins des cations sur la surface FI*

Nous utilisons toujours le modèle de superposition des feuillets décrit dans le chapitre 1 (§ II A).

En face de chaque ensemble de cations sur la surface FI, il y a un nombre variable de cavités hexagonales voisines. Pour $n = 1, 2$ et 3, il y en a respectivement 3, 5, 6 ou 7.

Avec trois cavités sur la surface FS, quatre cas sont possibles. Ils correspondent à 0, 1, 2, ou 3 cations sur la surface FS. Pour $n = 2$, nous avons 6 cas, etc. A chaque cas correspondent plusieurs configurations, de telle sorte que l'on arrive très vite à un dénombrement très lourd. Nous avons donc simplifié le problème de la façon suivante.

Sur la surface FI nous avons considéré les ensembles de 1, 2 ou 3 cations. Sur la surface FS, nous n'avons envisagé que les cas de 0 ou 1 cation dans les cavités voisines. Ceci signifie par exemple, que pour $n = 2$, nous avons décrit les cas de 2, 3, 4 et 5 cations sur la surface FS par le cas de 1 cation sur cette surface. Toutes les configurations sur la surface FS pour lesquelles il y a plus d'un cation représentent une probabilité de 0,28. Cette approximation revient à sous-estimer le nombre de molécules du type *b*.

C. — *Exemples*

Examinons le cas de $n = 1$. La probabilité d'avoir un cation isolé est 0,307. La probabilité pour que ce cation n'ait pas de voisins sur la surface FS est donnée par la probabilité de ne pas avoir de cations dans les trois cavités voisines sur la surface FS, soit $(1 - p)^3$.

La probabilité d'avoir un cation ou plus dans les trois cavités voisines sur la surface FS est $1 - (1 - p)^3$. On a donc :

1 cation sans cations voisins sur la surface FS : probabilité $= 0{,}307(1 - p)^3$
1 cation avec un cation voisin sur la surface FS : probabilité $= 0{,}307\,[1 - (1 - p)^3]$

Autour d'un cation isolé sans voisins sur la surface FS, il y a trois molécules du type m_{I_a}. On a donc une probabilité de $0{,}307\,(1 - p)^3$ d'avoir trois molécules m_{I_a}, soit un nombre de molécules de $3 \times 0{,}307(1 - p)^3$.

Quand il y a un cation voisin sur la surface FS (fig. 19 chap. 1), deux modes de répartition sont également probables (mode TDS et mode TDI). Pour le mode TDS, on a une probabilité de $0{,}307 \times (1 - (1 - p)^3) \times 0{,}5$; il lui correspond deux molécules m_{I_a} et deux molécules $m_{II_{bs}}$ (on ne compte que les molécules voisines du cation situé sur la surface FI). Pour le mode TDI, on a la même probabilité avec une molécule m_{I_a} et deux molécules $m_{II_{bi}}$.

D'une façon générale, le nombre total de molécules du type t situées près de 1, 2 ou 3 cations sur la surface FI est :

$$N_t = \sum_i p_i \cdot n_t^i$$

p_i = probabilité de la configuration i
n_t^i = nombre de molécules du type t dans la configuration i

Le nombre n_c se rapporte à un nombre total t de cations :

$n_c = 1 \times$ Probabilité d'avoir $n = 1 + 2 \times$ Probabilité d'avoir $n = 2 + 3 \times$ Probabilité d'avoir $n = 3$

soit

$$n_c = 1 \times 0{,}307 + 2 \times 0{,}421 + 3 \times 0{,}217 = 1{,}8$$

Ainsi peut-on définir le nombre moyen de molécules du type t par cation :

$$\overline{N_t} = \frac{N_t}{n_c}$$

Le nombre moyen total de molécules par cation est : $\overline{n} = \sum_t \overline{N_t}$

Pour le mode de répartition TD par exemple, on trouve par cation : 1,553 molécule m_{I_a} ; 0,420 molécule m_{II_a} ; 0,369 molécule $m_{II_{bs}}$; 0,324 molécule $m_{II_{bi}}$.

Quand on dénombre les différentes catégories de molécules, on en trouve certaines qui sont voisines à la fois de deux cations sur FI et de un cation sur FS. La proportion de ces molécules est de 6 p. 100 et nous les avons assimilées à des molécules du type $m_{II_{bs}}$ ou $m_{II_{bi}}$.

ANNEXE VI

DÉTERMINATION DU COEFFICIENT DE DIFFUSION

A. — *Conditions aux limites de l'équation de diffusion*

Ces conditions sont :

$$\begin{array}{llll} t = 0 & -l < x < 0 & C = C_0 ; & 0 < x < l \quad C = 0 \\ t > 0 & x = 0 & C = C_0/2 & \end{array}$$

Si l est suffisamment grand, le milieu de diffusion est considéré comme semi-infini et la solution de l'équation de diffusion s'écrit :

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \, erfc \, \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (1)$$

Cependant, l est toujours fini, et il faut savoir si sa valeur est convenable.

Pour cela, il est commode de prendre une autre solution de l'équation de diffusion. La méthode de séparation des variables conduit à (CRANK, 1964) :

$$C(x, t) = \sum_1^\infty (A_m \cdot \sin \lambda_m x + B_m \cdot \cos \lambda_m x) \exp (-\lambda_m^2 Dt) \qquad (2)$$

Avec :

$$\lambda_m = \frac{m\pi}{l}, \; m = (2n + 1)/2$$

$$A_m = -\frac{2 C_0}{(2n + 1)\pi} ; \qquad B_m = (-1)^n \cdot \frac{2 C_0}{(2n + 1)\pi}$$

d'où la solution cherchée.

La condition $C = C_0/2$ pour $t > 0$ et $x = 0$, s'écrit en tenant compte de (2) :

$$\begin{aligned} C(0, t) &= \sum_1^\infty B_m \cdot \exp (-\lambda_m^2 Dt) = C_0/2 \\ &= \frac{2 C_0}{\pi} \left[e^{-\lambda_1^2 Dt} - \frac{1}{3} e^{-\lambda_2^2 Dt} + \cdots + (-1)^n \frac{1}{2n + 1} e^{-\lambda_m^2 Dt} \right] \\ &= \frac{2 C_0}{\pi} S \end{aligned}$$

Or, arctg $(1) = 1 - 1/3 + \cdots + (-1)^n \cdot 1/(2n + 1) = \pi/4$.

On voit donc qu'il faut de petites valeurs de Dt et de grande valeurs de l pour que la somme S soit voisine de $\pi/4$.

Dans nos expériences, $l = 5 \cdot 10^{-1}$ cm, et la limite supérieure de Dt est 10^{-3} cm^2. Pour ces valeurs, $S = 0{,}785\,704$. $(\pi/4 = 0{,}785\,397)$.

Nous pouvons donc considérer que la longueur l est suffisamment grande pour que le milieu de diffusion soit semi-infini.

B. — *Constance du coefficient D*

A partir de (1), on écrit :

$$\text{Log } Y' = \text{Log} \left(\frac{1}{2\sqrt{\pi \, Dt}} \right) - \frac{x^2}{4 \, Dt} \quad \text{avec} \quad Y' = -\frac{d}{dx} \left(\frac{C}{C_0} \right)$$

La relation log Y' $= f(x^2)$ est linéaire si le coefficient D est constant. Ce test est appliqué dans trois cas couvrant l'ensemble du domaine de variation de D : diffusion de Na^+ dans l'argile sodique aux teneurs en eau de 4,8, 11,2 et 16 p. 100. La figure A 20 représente log Y' $= f(x^2)$. Pour réaliser cette représentation, nous avons utilisé des valeurs moyennes tirées des courbes expérimentales. Par mesure de commodité, nous avons représenté graphiquement log (10 Y').

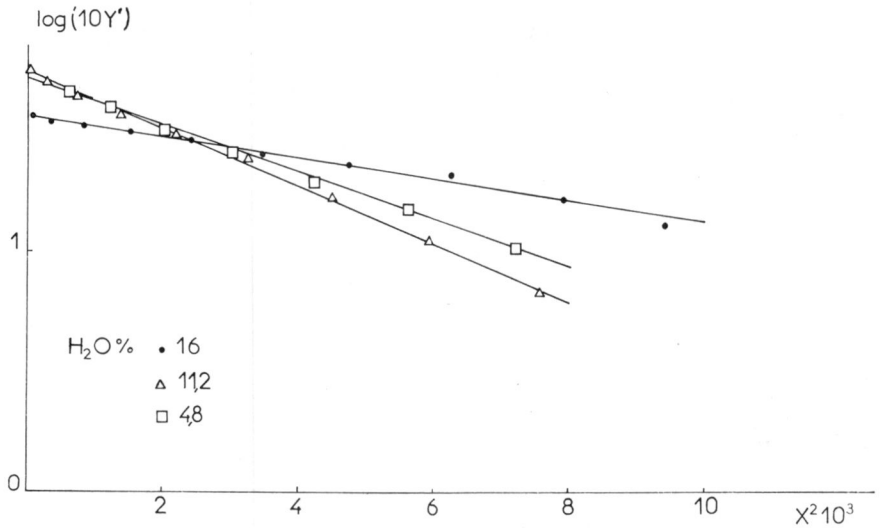


FIG. A 20. — *Test relatif à la constance du coefficient* D

L'analyse statistique montre que l'on a une probabilité supérieure à 0,99 d'avoir une relation linéaire entre log (10Y) et x^2. De plus, l'analyse de variance indique que le rapport

$$\frac{V_r}{V_e} = \frac{\text{Variance due aux effets de la régression}}{\text{Variance due à l'erreur}}$$

a une valeur supérieure à la valeur de F correspondant au nombre de degrés de liberté du système (F : valeur donnée par la table de Snedecor (in VESSEREAU, 1948)). Nous pouvons donc considérer avec certitude que D est constant.

C. — *Calcul de D*

Le calcul de D peut être basé sur les considérations précédentes. Ce n'est pas une méthode commode car l'évaluation numérique de $Y' = -\frac{d}{dx}\left(\frac{C}{C_0}\right)$ à partir des courbes expérimentales n'est pas facile. Il est plus rapide et plus précis de rechercher une courbe :

$$C = (C_0/2)\ (\text{erfc}\ (x/2\sqrt{Dt})\ ),$$

qui soit ajustée à la courbe expérimentale, $C = f(x)$. Les deux inconnues, C_0 et D doivent donc faire l'objet d'un ajustement.

Le principe est le suivant. Soit y une fonction de deux variables a et b. $y = f(a, b)$.

Soit a_0 et b_0 deux valeurs voisines de a et b :

$$\Delta a = a - a_0, \qquad \Delta b = b - b_0$$

d'où

$$y = f(a_0 + \Delta a, b_0 + \Delta b) = f(a, b)$$

Si la fonction y est dérivable, la formule des accroissements finis donne :

$$f(a, b) \simeq Y = f(a_0, b_0) + \Delta a \cdot f'a(a_0, b_0) + \Delta b \cdot f'b(a_0, b_0)$$

si Δa et Δb sont petits par rapport à a_0 et b_0

On a donc

$$Y = y^o + \Delta a \cdot y'(a) + \Delta b \cdot y'(b) \qquad (3)$$

avec $y^o = f(a_0, b_0)$; $y'(a)$ et $y'(b)$ sont les dérivées de $f(a, b)$ par rapport à a et b, pour $a = a_0$ et $b = b_0$.

Considérons maintenant une fonction $Y = f(a, b, x)$, où a et b sont des constantes inconnues dont on possède des valeurs approchées a_0 et b_0. On dispose d'une table de valeurs y_i correspondant à différentes valeurs de x_i.

Pour une valeur de x_i, (3) s'écrit :

$$Yi = y_i^o + \Delta a \cdot y_i'(a) + \Delta b \cdot y_i'(b)$$

Des estimations convenables de a et b sont obtenues en recherchant les valeurs qui rendent minimum la fonction :

$$V = \sum_i (Y_i - y_i)^2$$

On est alors conduit à résoudre un système de deux équations à deux inconnues :

$$\frac{\partial V}{\partial (\Delta a)} = \Delta a \sum_i y_i'^2(a) + \sum_i y_i'(a) \cdot (y_i^o - y_i) + \Delta b \sum_i y_i'(a) \cdot y_i'(b) = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial (\Delta b)} = \Delta b \sum_i y_i'^2(b) + \sum_i y_i'(b) \cdot (y_i^o - y_i) + \Delta a \sum_i y_i'(a) \cdot y_i'(b) = 0$$

Compte tenu de la formule (1) : $y = C$, $a = C_0/2$, $b = D$, d'où

$$y'(a) = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{b_0 t}}$$

$$y'(b) = a_0 \cdot \frac{x}{2b_0\sqrt{\pi b_0 t}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4b_0 t}\right)$$

(On rappelle que $erfcz = 1 - erfz$ et $g = erfz$ avec $g'(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-z^2)$).

D. — *Les contacts défectueux entre les pastilles*

Pour estimer l'ordre de grandeur des effets dûs aux contacts défectueux, nous avons étudié le système modèle représenté sur la figure A 21*a*.

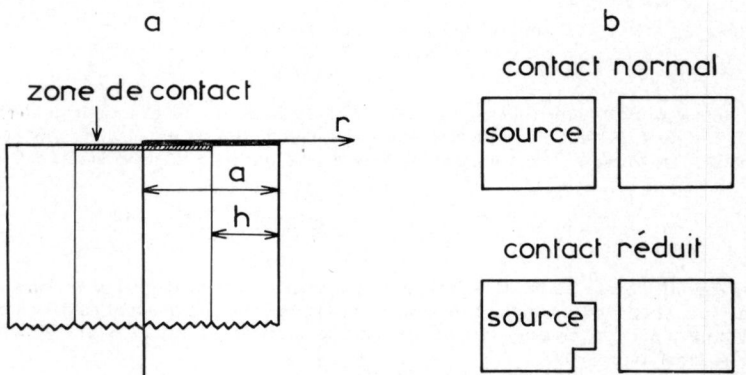


FIG. A 21. — *Influence du contact défectueux entre deux pastilles*
a : schéma utilisé pour le calcul
b : schéma montrant la réduction artificielle du contact

Les modifications de la distribution suivant l'axe des x sont dues à une diffusion radiale dans la couronne de largeur h. Nous avons étudié le cas simple caractérisé par les conditions aux limites suivantes :

$$t = 0 ; C = 0 \qquad a - h < r < a ; C = C_0 \qquad 0 < r < a - h$$

$$t > 0 \qquad \left[\frac{\partial C}{\partial r}\right]_{r=a} = 0$$

a est le rayon de la pastille.

La solution de l'équation de diffusion est obtenue à l'aide d'une méthode donnée par ADDA et PHILIBERT (1966).

$$C(r, t) = \frac{C_0}{a^2}(a - h)^2 + \frac{2C_0}{a^2}\sum_n \exp\left(-D\frac{\alpha_n^2 t}{a^2}\right)\frac{J_0\left(\frac{\alpha_n . r}{a}\right)}{J_0(\alpha_n)^2}\cdot\left(\frac{(a - h)a}{\alpha_n}\right)\cdot J_1\left(\frac{a - h}{a}\alpha_n\right)$$

où : J_0 = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 0
J_1 = fonction de Bessel de première espèce d'ordre 1
α_n = racines de $J_1(\alpha) = 0$

Expérimentalement, nous avons constaté que la surface de contact était au moins égale à la moitié de la vraie surface :

$$S(\text{contact}) = 1/2\,(\pi a^2) = \pi a_c$$

Pour $a = 0{,}3$ cm, $a_c = 0{,}212$ cm, $h = 0{,}078\,8$ cm
(a = rayon des pastilles cylindriques utilisées)

Nous avons déterminé les courbes de distribution pour $h = 0{,}05$ cm et $h = 0{,}10$ cm. La quantité de matière qui diffuse hors du cylindre $(a - h)$ est :

	$Dt = 10^{-3}$ cm²	$Dt = 10^{-4}$ cm²
$h = 0{,}05$ cm...	6,4 %	4,9 %
$h = 0{,}10$ cm...	7,3 %	5,0 %

(pourcentages par rapport à la quantité se trouvant dans le cylindre $(a - h)$ au temps $t = 0$).

Bien que ces évaluations aient été effectuées sur un modèle très simplifié, elles permettent de prévoir que la diminution de la surface de contact ne doit pas avoir d'effet sur la mesure, tout au moins si $Dt \leqslant 10^{-3}$ cm². Pour vérifier cette prévision, nous avons réalisé l'expérience suivante. Une surface de contact exagérément réduite a été obtenue en enlevant une couronne de 1 mm et nous avons mesuré à 20°C le coefficient de diffusion du sodium pour deux temps , t et $2t$ (fig. A 21*b*).

On a :

contact normal : $3{,}71 \cdot 10^{-7}$ cm² s^{-1}
contact réduit : $3{,}67 \cdot 10^{-7}$ cm² s^{-1}
: $3{,}58 \cdot 10^{-7}$ cm² s^{-1}

Les valeurs trouvées sont telles, que les écarts sont de l'ordre de grandeur de l'erreur expérimentale. Il est donc possible de conclure que dans les conditions expérimentales où nous nous sommes placé, les contacts défectueux n'entraînent pas une modification significative du coefficient D.

E. — *Anisotropie du milieu de diffusion*

La mesure des coefficients $D_{//}$ et $D_{\perp}$ montre que le milieu de diffusion est anisotrope. Pour estimer la vraie valeur du coefficient de diffusion D, nous avons pris en considération le schéma suivant. Étant donné que les mouvements des ions concernent essentiellement les surfaces basales des feuillets, nous avons posé :

— d'une part, que la direction du flux sur ces surfaces pouvait être représentée par un segment de droite OD ;
— d'autre part, que la direction d'un même segment de droite était valable pour toutes les surfaces basales des feuillets d'une particule.

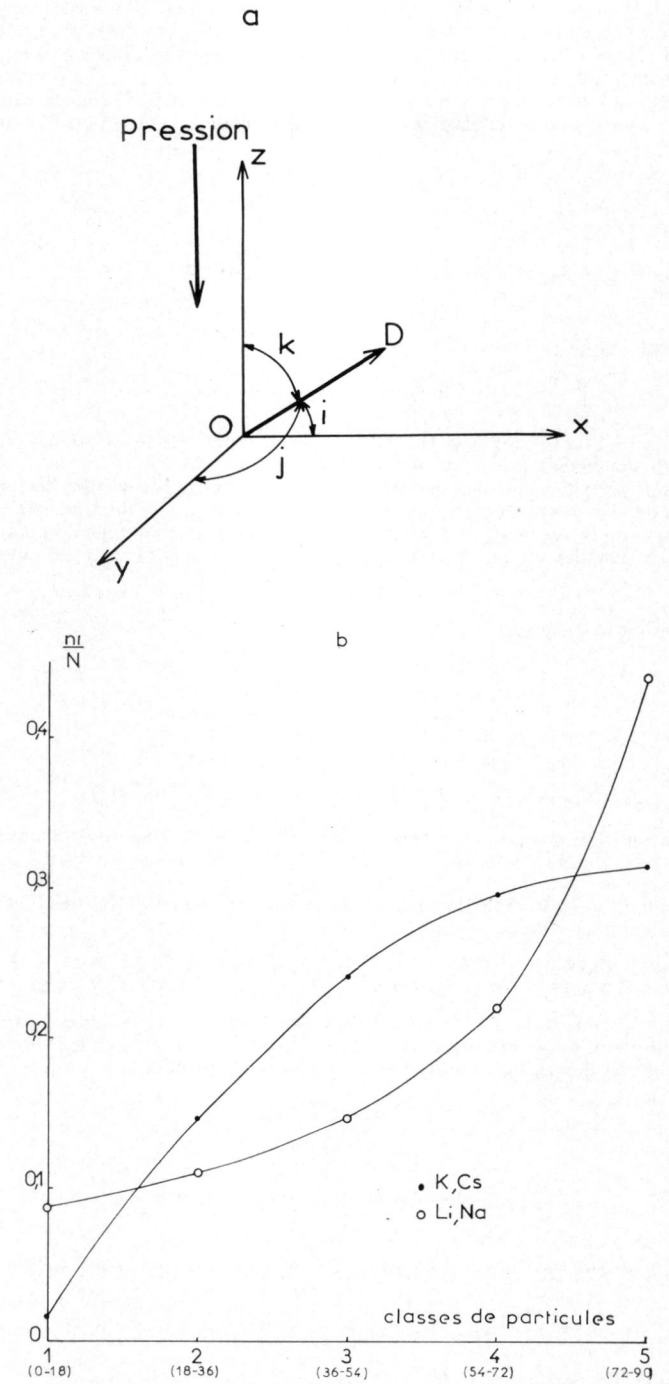


FIG. A 22. — *a* : *Système de coordonnées utilisé pour étudier l'anisotropie*
b : *Répartition des particules en classes suivant leur orientation*
Les valeurs limites des angles de chaque classe sont indiquées entre parenthèses

Le segment OD étant associé à la particule, nous pouvons repérer l'orientation de celle-ci dans un système d'axes perpendiculaires, par les valeurs des angles i, j et k faits par OD avec ces axes (fig. A 22*a*). Connaissant les coefficients D_x ou D_z associés aux directions O_x et O_z, il faut déterminer la valeur du coefficient D dans la direction OD, seule direction où se produit la diffusion.

La mesure du coefficient D_x est effectuée en appliquant un gradient de concentration d_C/d_x dans la direction O_x. La composante du gradient de concentration dans la direction OD est $(d_C/d_x) \cos i$.

Le flux dans la direction OD est : $F_D = - D \dfrac{dC}{dx} \cos i$

Or, $F_x = - D_x \dfrac{dC}{dx}$ d'où $D_x = D \cos^2 i$

Si la pression est appliquée dans la direction zO, nous avons :

$$D_z = D_{//} \qquad \text{et} \qquad D_x = D_y = D_\perp$$

On montre alors que :

$$D = D_{//} \cdot (2R + 1) \text{ avec } R = \frac{D_\perp}{D_{//}}$$

Le facteur $A = 2R + 1$ est appelé facteur d'anisotropie. Son utilisation permet d'estimer la vraie valeur du coefficient D à partir des mesures de $D_{//}$.

Ce traitement simple constitue aussi un moyen de décrire la répartition des particules d'argile en fonction de leur orientation. Supposons en effet, que le milieu de diffusion soit représenté par une succession de N segments OD (donc de N particules). Considérons de plus, que la distribution de ces N particules est une certaine fonction $f(k)$ de l'angle k. Par exemple, pour

$$0 \leqslant k \leqslant \pi/2$$

prenons cinq classes de particules :

n_1 particules avec $\quad 0 \leqslant k \leqslant 18^0$
n_2 particules avec $\quad 18^0 < k \leqslant 36^0$
n_3 particules avec $\quad 36^0 < k \leqslant 54^0$
n_4 particules avec $\quad 54^0 < k \leqslant 72^0$
n_5 particules avec $\quad 72^0 < k \leqslant 90^0$

$$n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 = N \qquad \text{et} \qquad n_i = f(k)$$

Admettons que dans chaque classe i, les n_i particules soient distribuées au hasard par rapport aux valeurs de k. Exemple : pour la classe 1, on a n_1 particules, donc n_1 valeurs de k distribuées au hasard entre 0° et 18°.

De cette façon, il est possible de calculer une valeur moyenne de R. Les fonctions $f(k)$ correspondant le mieux aux résultats sont :

— fonction hyperbolique pour l'argile Na à 11 p. 100 d'eau et l'argile Li à 12 p. 100 ;
— fonction parabolique pour l'argile K à 10,5 p. 100 d'eau et l'argile Cs à 12,5 p. 100.

Les valeurs expérimentales de R sont données dans le tableau 13 du chapitre II. Le graphique A 22 *b* représente deux types de distribution de particules en fonction de leur orientation. Ainsi, nous disposons d'une description approchée du milieu de diffusion.

ANNEXE VII

COMPLÉMENTS DE CALCUL RELATIFS AUX COEFFICIENTS DE DIFFUSION

A. — *Énergie d'activation*

1. *Évaluation des énergies WOHS et WOHI.*

Quand la distance entre un groupe OH chargé et un cation est grande, on peut admettre qu'il agit comme une charge ponctuelle. L'énergie varie donc en 1/R.

Pour la distance R_0 on a l'énergie WOH. En un point P à la distance R l'énergie est :

$$(WOH)_R = WOH \cdot \frac{R_0}{R} \frac{1}{\varepsilon}$$

WOH est donnée par le graphique A 12.

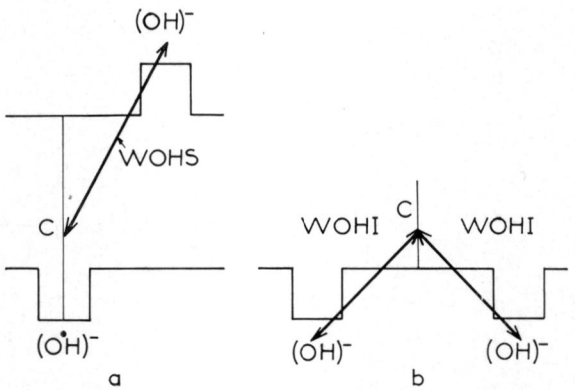


FIG. A 23. — *Schéma utilisé pour le calcul de WOHS et WOHI*

ε : constante diélectrique tenant compte des effets d'écran dus aux atomes d'oxygène de la surface. Pour estimer sa valeur, nous avons utilisé la polarisabilité de l'atome d'oxygène de la molécule d'eau $\alpha = 0{,}59 \cdot 10^{-24}$ cm³ (EISENBERG et KAUFMANN, 1969). On trouve $\varepsilon = 2{,}2$.

Nous avons besoin de ce calcul dans trois cas :

— calculs de $E_\perp$ et $E_{//}$ pour le chemin C. P_c. H(S)., quand sur la surface FS, il y a une cavité chargée et libre : WOHS (fig. A 23*a*) ;

— calculs de E// quand le cation est à mi-chemin entre deux cavités chargées sur la surface FI : WOHI (fig. A 23*b*).

2. *Calcul de* $E_{//}$.

$E_{//}$ est définie de la façon suivante : $E_{//} = E_p - E'_0$ avec :

E'_0 : énergie du cation lorsqu'il a atteint la cote d'échappement

E_p : énergie du cation au sommet de la barrière de potentiel.

La position de ce sommet est celle qui correspond à la plus petite variation d'énergie compte tenu des contraintes géométriques.

Pour les quatre chemins, E_p et E'_0 sont données par les expressions suivantes (voir fig. 28, chap. II).

Chemin C. P_c(H) · H(I)	: E'_0 = WFI + WFS	E_p = WTI + WHS + 2WOHI
Chemin C. P_c(T) · H(I)	: E'_0 = WFI + WFS	E_p = WTI + WTS + 2WOHI
Chemin C. P_cH(I)	: E'_0 = WFI + WFS	E_p = WP + WHS′ + 2WOHI
Chemin C. P_cH(S)	: E'_0 = WFI + WFS + WOHS	E_p = (WFI + WFS)′

WFI + WFS	valeurs tirées du graphique A 24 pour les cotes d'échappement $(CP)_e$.
WOHI, WOHS	voir précédemment.
WTI	énergie dans le champ électrique d'une cavité T sur la surface FI : graphique A 10 pour les cotes d'échappement $(CP)_e$.
WTS	énergie dans le champ électrique d'une cavité T sur la surface FS : graphique A 10 pour les cotes $(5{,}8 - (CP)_e)$.
WHS	énergie dans le champ électrique d'une cavité H située sur la surface FS. Graphique A 9 pour la cote $(5{,}8 - (CP)_e)$.
WHS′.	énergie dans le champ électrique d'une cavité H sur un axe décalé par rapport à la cavité H. Graphique A 25, cote $(5{,}8 - (CP)_e)$.
WP.	énergie dans le champ d'un groupe P. Graphique A 11, cote $(CP)_e$.
(WFI + WFS′)	valeurs tirées du graphique A 24 pour les cotes $(5{,}8 - (CP)_e)$.

Exemple | Na^+, chemin C. P_c(H). H(I)., $(CP)_e$ = 1,82 Å (passage au col) on a :
$E_0' = -139{,}6$ kcal mole^{-1} ; WTI = — 57,6 kcal mole^{-1} ;
WHS = — 35,2 kcal mole^{-1} ; 2 WOHI = — 40,4 kcal mole^{-1} ;
$E_p = -133{,}2$ kcal mole^{-1} ;
$E_{//} = +6{,}4$ kcal mole^{-1}.

(WHS′ est calculée à l'aide de la méthode donnée dans l'annexe III).

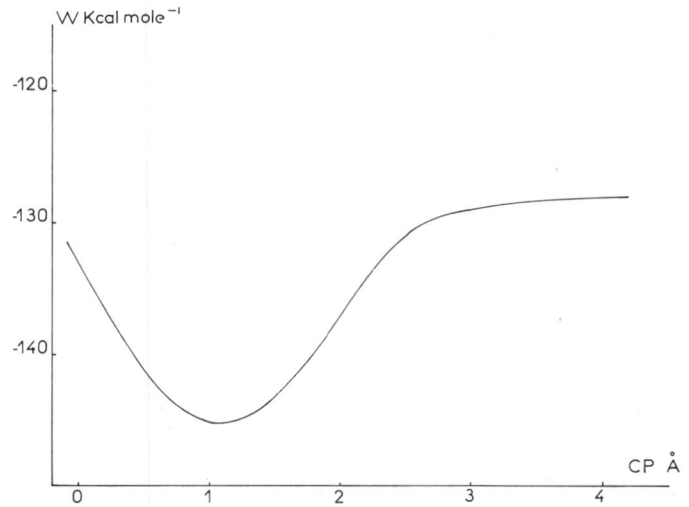


FIG. A 24. — *Énergie potentielle du cation compensateur dans le champ électrique du réseau (WFI + WFS)*

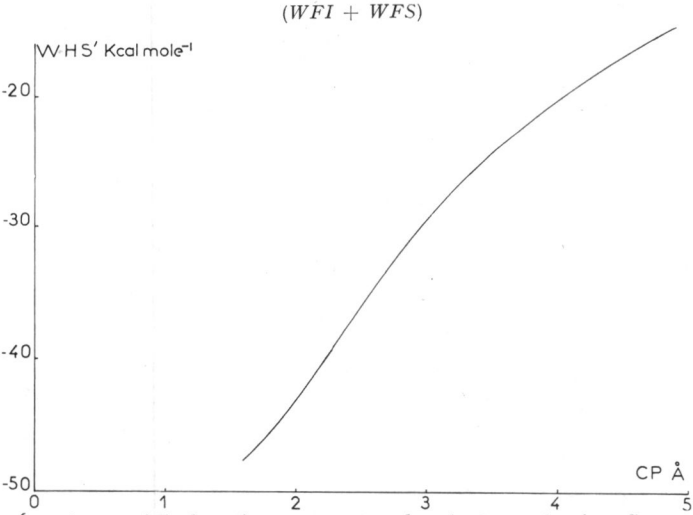


FIG. A 25. — *Énergie potentielle du cation compensateur dans le champ électrique d'une cavité H (WHS′)*
Le cation est situé sur un axe qui est à 1,47 Å de l'axe de la cavité

B. — *Calcul de la distance moyenne de saut*

L'expression de la distance moyenne de saut est :

$$\bar{\delta} = \left[\delta_{i1}\,(P \sum p_i\,\delta_{ij} + P'\,\delta_s)\right]^{1/2}$$

Par exemple, pour $p = 0{,}20$ on a $P = 0{,}514$ et $P' = 0{,}486$

$\Sigma p_i\, \delta_{ij} = 0{,}693 \cdot d_1 + 0{,}190 \cdot d_2 + 0{,}075 \cdot d_3 + 0{,}035 \cdot d_4 + 0{,}010 \cdot d_5 + \ldots$.
$d_1 = 5{,}10$ Å ; $d_2 = 8{,}833$ Å ; $d_3 = 10{,}20$ Å ; $d_4 = 13{,}49$ Å ; $d_5 = 15{,}30$ Å
$\delta_s = 2{,}94$ Å : distance parcourue parallèlement au feuillet pour un saut FS.

On trouve : $\bar{\delta} = 4{,}96$ Å

Pour $p = 0{,}127$, on trouve de la même façon avec $P = 0{,}605$ et $P' = 0{,}395$: $\bar{\delta} = 5{,}57$ Å.

Dès lors : $\dfrac{\bar{\delta}}{\bar{\delta}'} = 0{,}89$

Les valeurs des probabilités p_i sont données dans le tableau 1 (chap. 1). Celles de P et P' sont calculées en utilisant la méthode décrite dans l'annexe V.

Ann. agron., 1973, **24** (2), 219-240.

ÉTUDE D'UN SOL LESSIVÉ GLOSSIQUE DÉVELOPPÉ SUR LIMON ÉOLIEN EN FORÊT DE TROIS-FONTAINES (MARNE)

D. MAGNIANT, P. DUTIL * et M. JAMAGNE **

Chambre d'Agriculture de la Marne,
51000 Châlons sur Marne

* *Station d'Agronomie, I. N. R. A.,*
51000 Châlons sur Marne

** *Service d'Étude des Sols et de la Carte pédologique de France,*
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Dans la région du Perthois marnais la présence d'un recouvrement de limons éoliens a permis le développement de profils pédologiques très évolués atteignant le stade du sol lessivé glossique. Pour tenter d'expliquer la genèse de ces sols, une étude de détail a été entreprise sur les différents horizons d'un profil type, par les moyens analytiques classiques d'une part et à l'aide de la détermination des minéraux argileux et de l'observation micromorphologique d'autre part. Il apparaît que les limons ont tout d'abord subi une phase de désaturation du complexe absorbant avec lessivage, déterminant une illuviation primaire. Puis, l'horizon argileux formé a été créateur d'un milieu à hydromorphie temporaire, de caractère réducteur, ayant permis une ségrégation fer-argile. Enfin, le sommet de l'horizon d'illuviation primaire a été progressivement altéré, alors que se développaient en profondeur les langues de dégradation, siège actuel d'une illuviation secondaire. Si la mise en valeur de ces sols ne pose pas de problèmes majeurs sur le plan de la fertilisation minérale, leur utilisation rationnelle reste étroitement liée au régime de l'eau que seul un assainissement correctement exécuté permet de maîtriser.

I. — GÉNÉRALITÉS

Dans le cadre de la cartographie systématique de la feuille de Saint-Dizier à l'échelle 1/100 000, notre attention a été portée plus particulièrement sur les formations limoneuses, couverture influençant l'évolution de la plupart des sols de la région étudiée.

La pédogenèse, sur ce matériau, a conduit :

— soit à des sols bruns lessivés, ou des sols lessivés à endo-hydromorphie variable, terres céréalières et betteravières mises en culture depuis déjà plusieurs siècles,

— soit à des sols lessivés dégradés à forte endo-hydromorphie caractéristiques des zones boisées ou de prairies permanentes de faible rapport.

Cette étude a pour but, en présentant l'analyse détaillée d'un profil type, d'essayer de définir son mode de formation, et de dégager les idées essentielles relatives à une meilleure mise en valeur des sols lessivés glossiques développés sur limon.

II. — LE MILIEU NATUREL

Le profil étudié est situé en plein cœur du massif boisé de Trois-Fontaines, petite région naturelle prenant place à l'extrémité est du département de la Marne, au nord de la ville de Saint-Dizier.

Ce massif domine d'une cinquantaine de mètres les basses terrasses de la Marne, immense cône de déjections fluviales provenant de la désagrégation des roches calcaires du Jurassique situées en amont ; fortement entaillé par l'érosion, le limon éolien, qui recouvrait initialement l'ensemble du paysage, laisse apparaître sur les flancs des ruisseaux encaissés, des niveaux géologiques très variés appartenant au Crétacé inférieur et au Portlandien (MAGNIANT et DUTIL, 1971).

Une chênaie plus ou moins dégradée par l'exploitation forestière couvre la quasi-totalité de la région ; seules quelques prairies permanentes se sont installées sur les rares affleurements de calcaire dur et parfois sur limon.

Le climat est du type semi-continental à atlantique, caractérisé par des orages violents durant les mois de juillet et août et des vents dominants du sud-ouest. Les précipitations présentent une répartition générale régulière avec un minimum marqué en mars.

TABLEAU I

Hauteur moyenne des précipitations (en mm) *à Saint-Dizier*
(1931-1960)

Janvier 69	Avril 50	Juillet 70	Octobre 62
Février 60	Mai 65	Août 70	Novembre 61
Mars 40	Juin 74	Septembre 60	Décembre 65

La hauteur totale annuelle moyenne des précipitations est de 746 mm.

La somme des précipitations pour la période de végétation intense, soit d'avril à septembre, s'élève à 389 mm à Saint-Dizier.

Les températures moyennes mensuelles montrent un maximum de 18,5°C en juillet et un minimum de 2,1°C en janvier ; l'amplitude, écart entre la moyenne du

mois le plus froid et celle du mois le plus chaud, étant de 16,4°C, il s'agit d'un climat relativement tempéré. La température moyenne annuelle est de : 10,4°C.

L'évapotranspiration potentielle moyenne, calculée à partir de la formule de Turc (Turc, 1961) s'élève à 649 mm pour Saint-Dizier (Magniant et Dutil, 1969) dont 535 mm pour la période de végétation intense.

TABLEAU 2

Moyenne des températures (°C) *à Saint-Dizier*
(1931-1960)

Janvier 2,1	Avril 9,8	Juillet 18,5	Octobre 10,6
Février 3,0	Mai 13,5	Août 18,0	Novembre 6,3
Mars 6,8	Juin 16,8	Septembre 16,7	Décembre 3,2

La formule de drainage (Hénin et Aubert, 1945) basée sur le degré d'aridité du climat et la perméabilité de la roche-mère donne, pour les formations limoneuses, une valeur de 200 mm indiquant donc une nette tendance à la podzolisation.

III. — DESCRIPTION ET RÉSULTATS ANALYTIQUES D'UN PROFIL TYPE DE SOL LESSIVÉ DÉGRADÉ

3. 1. — *Description du profil* (fig. 1)

Localisation : carte Saint-Dizier — 3-4 ; profil PE-202 ; les Hoirs.
Date : juin 1968.
Végétation : Forêt — Futaie passant en taillis : chênes, quelques charmes et hêtres ; fougères, ronces.
Topographie : petit plateau, microrelief : anciens labours en planches.
Altitude : 163 mètres.
Roche-mère : limon éolien.
Drainage : faible.
Pierrosité : nulle.
Classification : sol lessivé dégradé.
Série : —LL4*d*— (Jamagne, 1967).

A_0 (1-0 cm).

Peu importante, litière de feuilles en voie de décomposition.

A_{11} (0-10 cm).

Horizon limoneux de couleur 10 YR 4/3 — humide — non calcaire — structure polyédrique fine émoussée mal développée et instable — absence de cailloux — très nombreuses racines — limite tranchée.

A_{12} (10-18 cm).

Horizon limoneux de couleur 10 YR 6/4 — humide — non calcaire — structure polyédrique fine émoussée mal développée et instable — absence de cailloux — nombreuses racines — quelques taches de rouille mal définies et petites concrétions de Fe-Mn, limite graduelle.

A_{21} (18-35 cm).

Horizon limoneux de couleur 10 YR 6/3 — humide — non calcaire — structure polyédrique émoussée mal développée — absence de cailloux — nombreuses racines — présence de taches de couleur : 7.5 YR 4/4 — 5 à 10 p. 100 de taches — limite brutale.

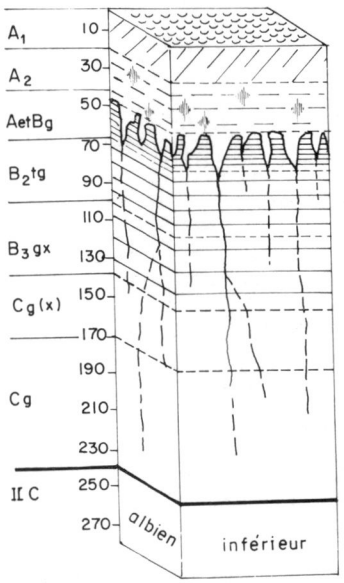


FIG. 1. — *Schéma du profil de Trois-Fontaines*

A_{22g} (35-42 cm).

Horizon limoneux — couleur de fond : 10 YR 6/3 — couleur des taches : 7.5 YR 4/4 — frais — non calcaire — structure polyédrique fine légèrement mieux développée et assez stable — absence de cailloux — quelques racines — présence de grosses taches d'oxydation et de 15 p. 100 de concrétions bien développées — gainage des petites racines — limite tranchée et irrégulière, cet horizon pénétrant en langues dans l'horizon A et B*g* sous-jacent.

A et B_g (42-60 cm).

Horizon limono-argileux caractérisé par une texture non homogène résultant de la présence de zones de dégradation plongeant dans l'horizon illuvial — texture plus lourde en B qu'en A — couleur de la matrice du B : 10 YR 5/6 — couleur des langues : 10 YR 7/3 — couleur des quelques taches d'oxydation : 7.5 YR 4/4 — assez frais — non calcaire — structure polyédrique moyenne bien développée et stable dans l'horizon illuvial et structure polyédrique fine mal développée dans le A — absence de cailloux — quelques racines — 10 p. 100 de concrétions noirâtres très friables — limite tranchée et irrégulière.

B_{2tg} (60-100 cm).

Horizon argilo-limoneux — couleur de fond : 10 YR 5/6 — zone déferrifiée : 10 YR 6/4 — couleur des zones oxydées : 7.5 YR 5/6 — couleur des revêtements : 10 YR 5/4 — assez frais — non calcaire — structure polyédrique moyenne stable et bien développée — quelques rares concrétions Fe-Mn peu indurées — absence de cailloux — quelques grosses racines préférentiellement dans les langues blanchies — limite graduelle.

B_{3gx} (100-140 cm).

Horizon limono-argileux — couleur de fond : 10 YR 5/6 — zone déferrifiée : 10 YR 6/4 — assez sec — non calcaire — caractères de fragipan typique — structure prismatique grossière bien développée dont les agrégats montrent un vaste réseau du genre polygonal en

TABLEAU 3

Analyses physiques

Profondeur en cm	Horizon	Argile	Limons		Sables		MO	da	pH-eau	pH-KCl	Calcaire total
			fins	grossiers	fins	grossiers					
1-0	A_0						9,5		5,40		abs.
0-18	A_1	11,1	35,4	34,7	9,2	4,9	3,0		5,00	4,26	—
20-40	A_{2g}	12,1	36,1	33	11,7	5,8	0,89	1,3	4,80	4,05	—
40-60 (M)*	A et B_g	25,6	30,1	31,3	8,4	4,6			4,60	3,65	—
— (L)**	—	20,2	34,0	34,0	8,2	3,4			4,65	3,60	—
60-80 (M)	B_{2tg}	32,3	32,7	26,3	6,6	2,1		1,5	4,65	3,55	—
— (L)	—	28,6	29,4	32,1	7,1	2,6			4,85	3,60	—
80-100 (M)	B_{2tg}	31,5	30,3	26,9	8,5	2,8			4,75	3,65	—
— (L)	—	36,2	26,6	27,4	7,5	2,3			4,90	3,50	—
100-120 (M)	B_{3gx}	27,7	29,6	30,8	8,7	3,2		1,8	4,80	3,65	—
— (L)	—	33,8	26,6	28,6	8,4	2,4			4,95	3,45	—
130-150	C_{gx}	24,2	32,5	29,4	9,3	4,0	0,34		5,25		—
240-260	IIC	36,2	9,2	5,9	40,4	8,0			4,70		—

* (M) = Matrice.
** (L) = Langues blanchies.

TABLEAU 4

Analyses chimiques

Profondeur (cm)	Horizon	C (p. 1 000)	N (p. 1 000)	C/N	En milliéquivalents pour 100 g					Fer libre (p. 1 000)	Fer total (p. 1 000)	Al. éch. (p. 1 000)	P_2O_5 assimil.
					C. T. E.	Ca	Mg	K	Na				
1-0	A_0	55,2	3,8	14,5									
0-18	A_1	17,64	1,60	11,02	10	2,55	0,45	0,32	0,043	5,8	11,6	0,120	0,02
20-40	A_{2g}	5,3	0,51	10,39	10	0,75	0,25	0,13	0,039	8	17,8	0,176	0,01
40-60 (M)*	A et B_g	2,3	0,36	6,38	20	4,52	0,13	0,34	0,120	14,3	26,5	0,330	
— (L)**	—				20	3,63	0,02	0,24		6,6	17,0	0,290	
60-80 (M)	B_{2tg}				27	8,14	0,11	0,42	0,065	16,5	32,4	0,430	absent
— (L)	—				21	6,54	0,06	0,34		5,7	17,2	0,295	
80-100 (M)	B_{2tg}				27	9,15	0,20	0,36	0,10	16,0	30,6	0,355	absent
— (L)	—				26	7,92	0,23	0,40		4,1	19,6	0,420	
100-120 (M)	B_{3gx}	1,6	0,34	4,44	22	7,26	0,14	0,27	0,125	12,8	25,5	0,315	absent
— (L)	—				27	9,63	0,27	0,45		3,3	18,8	0,445	
130-150	C_{gx}												
240-260	IIC												

* (M) = Matrice.
** (L) = Langues blanchies.

plan horizontal — compacité accentuée et porosité faible — concrétions noire Fe-Mn bien individualisées — absence de cailloux — absence de racines — limite graduelle.

C_g (*x*) (140-170 cm).

Horizon limono-argileux — couleur de fond : 10 YR 5/6 — sec — non calcaire — caractères de fragipan peu marqués — structure prismatique grossière bien développée dont les agrégats montrent un réseau du genre polygonal — concrétions noires Fe-Mn très bien individualisées — absence de cailloux — absence de racines — limite diffuse.

C_g (170-240 cm).

Horizon limono-argileux — couleur de fond : 10 YR 5/6 — sec — non calcaire — structure prismatique assez mal développée — concrétions Fe-Mn moins bien individualisées — absence de cailloux — absence de racines — limite brutale.

II C (240-260 cm).

Sables verts glauconieux de l'Albien inférieur de texture argilo-sableuse.

3. 2. — *Analyses physique et chimique*

Ce profil situé sous forêt présente une teneur en matières organiques de 9,5 p. 100 pour l'horizon A_0 avec un C/N assez élevé de 14,5. L'indice d'entraînement d'argile est très voisin de 3, celui du fer libre dans la matrice est de 2,8 ; par contre, les teneurs en fer libre dans les langues blanchies sont très faibles, de 6,6 à 3,3 p. 1 000.

La saturation du complexe oscille autour de 30 p. 100 mis à part l'horizon A_2 pour lequel l'on obtient seulement 11,7 p. 100 (voir fig. 2 et 3).

La densité apparente, égale à 1,3 dans les horizons supérieurs, atteint 1,8 au niveau du fragipan et permet d'expliquer le faible drainage de ce profil.

3. 3. — *Analyse minéralogique par diffraction des rayons X*

Les analyses aux rayons X (Laboratoire de Géologie de la Faculté des Sciences de Strasbourg) montrent que :

— la kaolinite et l'illite varient peu du sommet à la base du profil,
— les interstratifiés vermiculitiques et la vermiculite sont abondants en surface tandis que les édifices gonflants de type (14V-14M) sont strictement localisés dans les horizons d'accumulation.

TABLEAU 5

Analyse par diffraction des rayons X

Profondeur en cm	Horizon	K	I	(10-14 V)	V	(14V-14M)
25	A_{21g}	2	1	4	3	—
40	A_{22g}	2	2	4	2	—
55	A et B_g (L)**	2	2	traces	6	—
65	B_{2tg} (M)*	1	2	—	—	7
120	B_{3gx} (M)	1	1	—	—	8
120	B_{3gx} (L)	1	2	—	—	7

* (M) = Matrice.
** (L) = Langues blanchies.

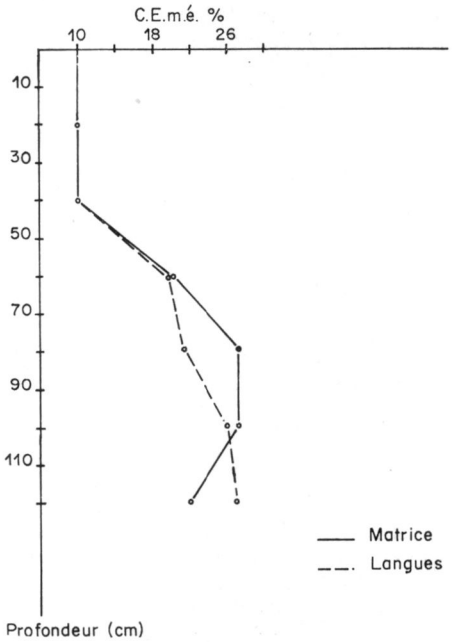


FIG. 2. — *Capacité d'échange en méq. pour 100 g*

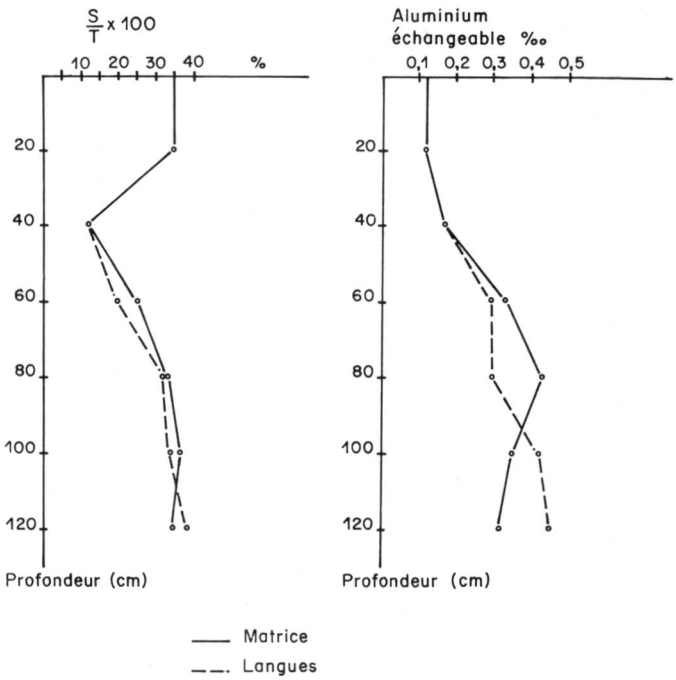


FIG. 3. — *Rapport* $\frac{S}{T} \times 100$ *et aluminium échangeable p. 1 000*

3. 4. — *Description micromorphologique*

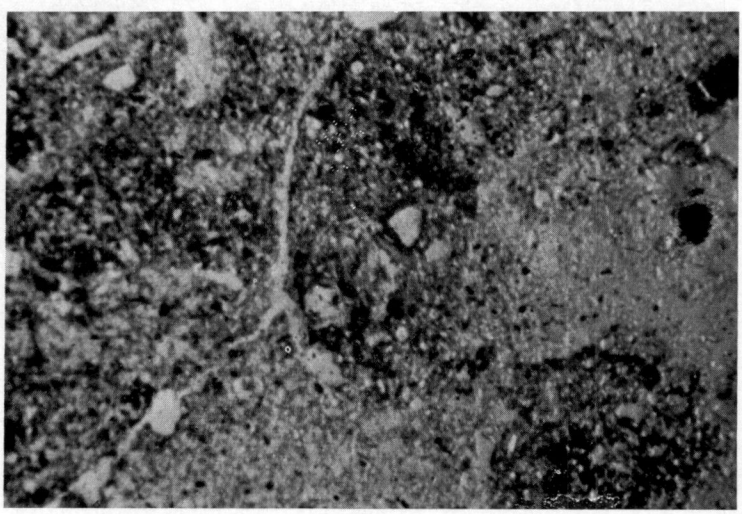
Les descriptions sont effectuées sur la base de la nomenclature de BREWER (1964), adaptée par LARUELLE (1967) et le laboratoire de micromorphologie de Grignon (1968).

A_{12g} (15 cm).

Le squelette est relativement hétérogène ; essentiellement quartzeux, on peut y observer la présence de fragments de micas, de quelques feldspaths et de quelques grains de glauconie assez altérée. Il s'agit d'un limon éolien enrichi en sables, ceci étant dû aux sables grossiers de l'Aptien supérieur partout présents dans le paysage. La glauconie peut être attribuée aux sables verts glauconieux de l'Albien inférieur, substratum géologique trouvé à 2,40 m.
Le plasma est irrégulièrement distribué et comporte une certaine quantité de matière organique.
L'assemblage plasmique est du type silasépique.
L'assemblage élémentaire est à tendance granulaire.
Les vides sont surtout constitués par des cavités « ortho ».
Les traits pédologiques sont constitués par des glébules et par des haloglébulaires de nature organo-ferrique.

A_{22g} (40 cm).

Le squelette est plus hétérogène que dans l'horizon précédent ; les grains de quartz sont fortement émoussés, parfois pratiquement arrondis ; on peut observer quelques grains de glauconie.
Le plasma est mieux réparti dans le fond matriciel mais est cependant hétérogène car des ségrégations ferriques importantes se sont localement différenciées. Une partie de l'échantillon étudié apparaît donc comme appauvrie en plasma.
Quelques séparations plasmiques se distinguent.
L'assemblage plasmique est soit silasépique, soit à tendance squelinsépique.
L'assemblage élémentaire, difficile à définir, serait du type intertextique.
Les vides sont constitués par des cavités « ortho ».
Les traits pédologiques, plus marqués que dans l'horizon précédent, sont constitués par d'importants nodules soit très ferriques et bien individualisés dans le fond matriciel, soit argilo-ferriques.



CLICHÉ 1. — *Horizon* A_{22g}
Nodules ferriques et argilo-ferriques. LN : × 60

A et B_g (60 cm).

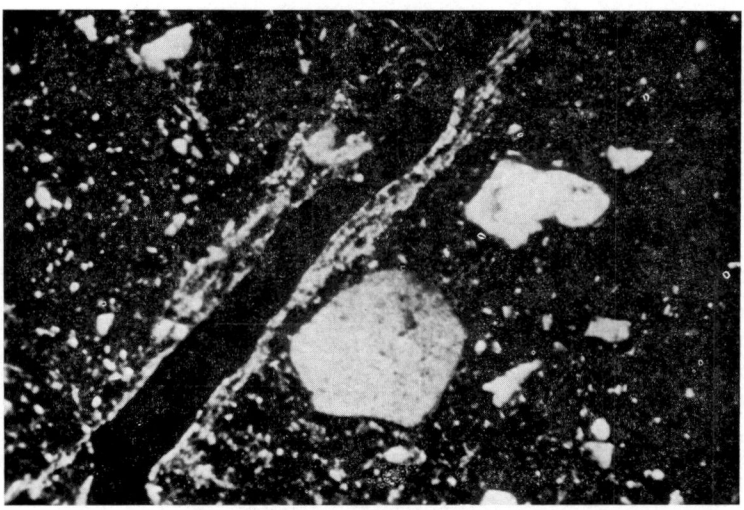
Le squelette est analogue à celui de l'horizon sous-jacent.
Le plasma est très hétérogène dans sa répartition et sa nature ; des parties très appauvries côtoient les plages plus denses où l'on note la présence d'importantes ségrégations ferriques à limites assez diffuses.
L'assemblage plasmique dans les plages blanchies est du type silasépique, dans les zones denses, du type squelinsépique à in-squelsépique. L'assemblage élémentaire est une transition entre aggloméré et intertextique.
Les vides sont du type ortho dans les plages pauvres en plasma et du type méta dans le reste de la masse.

Les traits pédologiques sont nombreux :

— des glébules du type nodules, moyennement différenciés, englobent des caractères d'illuviation, reliques d'un horizon B_t typique d'un stade d'évolution antérieur,
— des argilanes de plusieurs types :
argilanes à ferriargilanes jaunes de genèse récente répartis le long des parois des vides, très fins et fortement orientés,
ferriargilanes bruns, plus épais et peu biréfringents,
fragments de ferriargilanes réenglobés dans le fond matriciel.

B_{2tg} (80 cm).

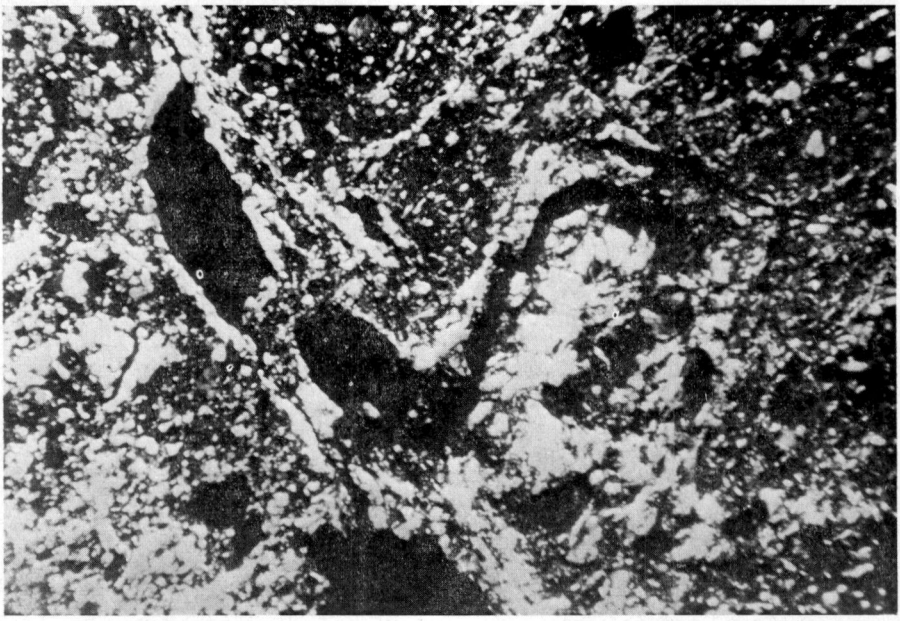
Le squelette est hétérogène ; les grains de quartz paraissent peu corrodés ; quelques grains de glauconie sont présents.
Le plasma est très hétérogène : de nature argilo-ferrique dans certaines zones et argileuse ailleurs.
L'assemblage plasmique dans les plages appauvries en plasma est à dominance squelinsépique à silasépique, dans le fond matriciel, à tendance squelsépique.
L'assemblage élémentaire varie entre aggloméré, intertextique et porphyrique.
Les vides se modifient en relation avec une perte de porosité ; les chenaux et chambres deviennent dominants avec un réseau de fentes plus ou moins déviées.



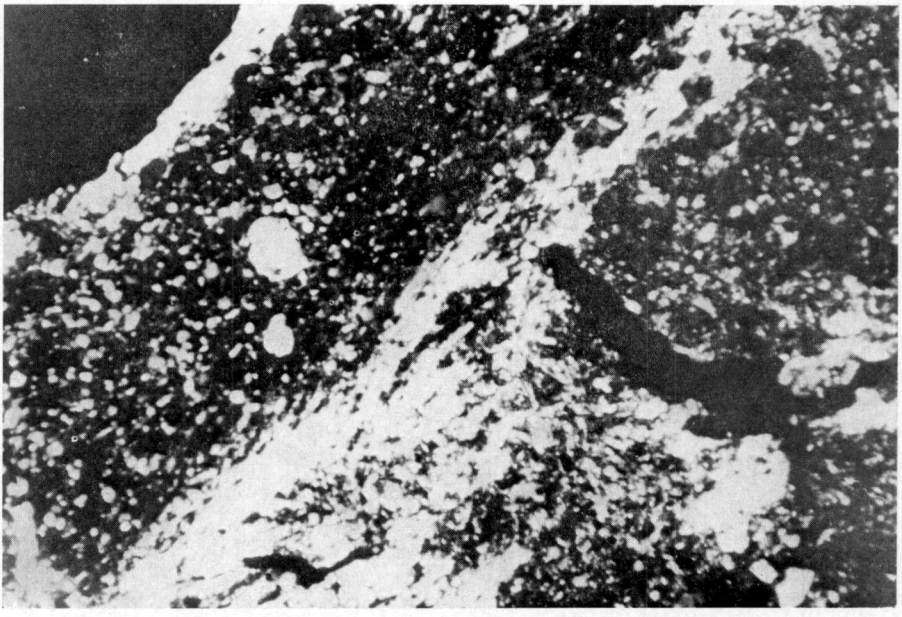
Cliché 2. — *Horizon* B_{2tg}
Ferriargilanes altérés, modérément biréfringents. LP : × 100

Les traits pédologiques sont variés :

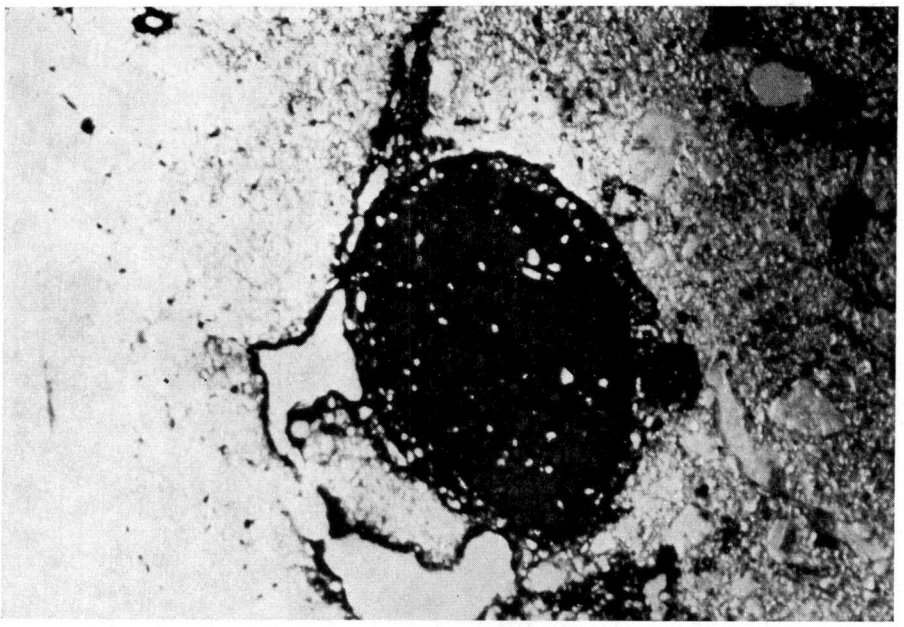
— le plasma dense contient des fragments de ferriargilanes englobés dans des concentrations plasmiques et dans des halos glébulaires,
— des argilanes jaunes clairs plus récents sont localement répartis sur les parois des vides,
— des sesquanes sont partiellement intégrés en position subcutanique et sont assez fréquemment recouverts par les argilanes clairs,



CLICHÉ 3. — *Horizon* B_{2tg}
Argilanes jaune clair récents et fragments de ferriargilanes. LP : × 100



CLICHÉ 4. — *Horizon* B_{3gx}
Aspect caractéristique des produits d'illuviation secondaire, association d'argilanes et squeletanes. LP : × 100



CLICHÉ 5. — *Horizon C_g*
Nodule ferrique et sesquanes associés. LN : × 60

CLICHÉ 6. — *Horizon C_g*
Ferriargilanes et sesquanes sur les parois des vides. LN : × 6

— les plages correspondant aux langues contiennent essentiellement des cutanes argileux jaunes clairs assez déferrifiés, caractéristiques de l'illuviation dite « secondaire »,
— des nodules ferriques englobent des ferriargilanes fragmentés ou maintenus en place.

B_{3gx} (130 cm).

Le squelette est assez hétérogène.
Le plasma présente deux zones : l'une déferrifiée, l'autre nettement ferrique. Cette différenciation correspond à celle observée sur le terrain entre les faces verticales grisâtres et la frange ocre qui borde.
L'assemblage plasmique est du type squelinsépique (plages ferriques) et très variable (plages blanchies).
Les vides sont représentés par un réseau très typique de fentes, associé à des chenaux et cavités du type méta. Aspect très dense du matériau.

Les traits pédologiques sont divers :

— des ferriargilanes peu nombreux dans la matrice ferrique,
— des argilanes jaune clair d'illuviation secondaire se répartissent en position cutanique ou subcutanique le long des fentes du réseau et sur les parois des cavités, interstratifiés avec des particules de limon fin,
— des nodules opaques peuvent être considérés comme des pédoreliques.

C_g (190 cm).

Le squelette grossier contient des traces de glauconie.
Le plasma est relativement homogène.
L'assemblage plasmique est typiquement in-squelsépique.
L'assemblage élémentaire est à tendance intertextique.
Les vides sont constitués par des chambres et cavités méta et par un certain nombre de chenaux.

Les traits pédologiques sont :

— des ferriargilanes situés dans les cavités et les chenaux ; une dissociation avec individualisation du fer semble caractériser certains d'entre eux, ce qui pourrait signifier une genèse plus ancienne que celle liée aux ferriargilanes plus homogènes,
— des sesquanes bien différenciés,
— des nodules ferriques à limites progressives vraisemblablement liés à l'évolution actuelle,
— des pédoreliques constitués par des concrétions et nodules ferriques à limites très nettes et à contenu indépendant de l'ensemble du fond matriciel.

IV. — INTERPRÉTATION GÉNÉRALE DU PROFIL ÉTUDIÉ

4. 1. — *Les migrations d'argile*

4. 11. *Observations macroscopiques.*

Le profil étudié présente des signes d'un lessivage intense caractérisé morphologiquement par un horizon d'accumulation d'argile B_{2t} avec des revêtements importants situé entre 60 et 100 centimètres.

A l'analyse physique, matrice et langues blanchies montrent une nette accumulation d'argile au sein de cet horizon B_{2t} mais différent pour une même profondeur, à la fois par les teneurs en argile et par l'indice d'entraînement (fig. 4). C'est ainsi que les maxima d'accumulation sont situés entre 60 et 80 centimètres dans la matrice et entre 80 et 100 centimètres dans les langues blanchies, les indices d'entraînement d'argile étant respectivement de 2,9 et 3,3.

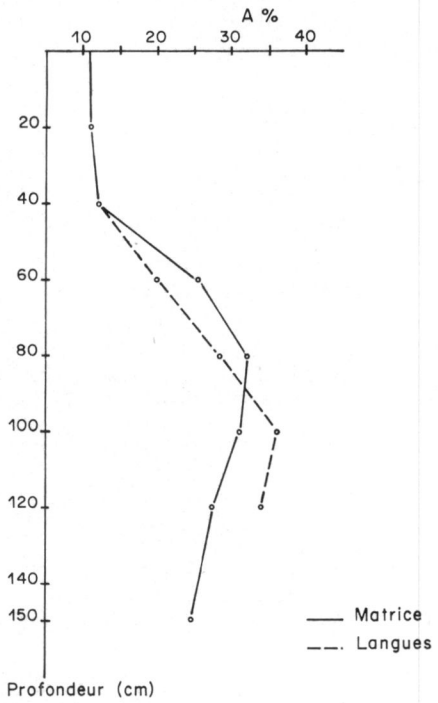


FIG. 4. — *Teneur en argile pour 100 g*

4. 12. *Observations microscopiques.*

Les horizons d'accumulation d'argile présentent des revêtements variés :

— revêtements argilo-ferriques ou « ferriargilanes » très nombreux et fortement développés, envahissant partiellement ou totalement les vides, les surfaces des agrégats et englobés au sein de la matrice ferrique dans des concentrations plasmiques,

— revêtements argileux ou « argilanes », jaune clair, répartis sur les parois des vides et envahissant les langues blanchies et se présentant en position cutanique ou subcutanique.

Au sein du fragipan, les ferriargilanes deviennent beaucoup moins nombreux tandis que les argilanes jaune clair prennent un grand développement soit en position cutanique soit en position subcutanique en bandes assez continues liées au système de fentes du réseau et sur les parois des cavités, interstratifiés avec des particules de limon fin.

Il apparaît donc que, dans ce profil, les migrations d'argiles sont complexes puisqu'en plus des ferriargilanes caractéristiques d'un simple phénomène de lessivage existent des argilanes jaune clair trouvés en position cutanique et subcutanique dans des zones très particulières blanchies correspondant aux langues observées sur le profil.

4. 2. — *Les migrations du fer*

4. 21. *Observations macroscopiques.*

Les dépôts d'oxydes de fer associés aux oxydes de manganèse, déjà présents dans l'horizon A_{21} sous forme de petites taches rouille et de rares concrétions, devienne nombreux à la base de l'horizon A_{22g} et dans l'horizon A et B_g donnant de grosses

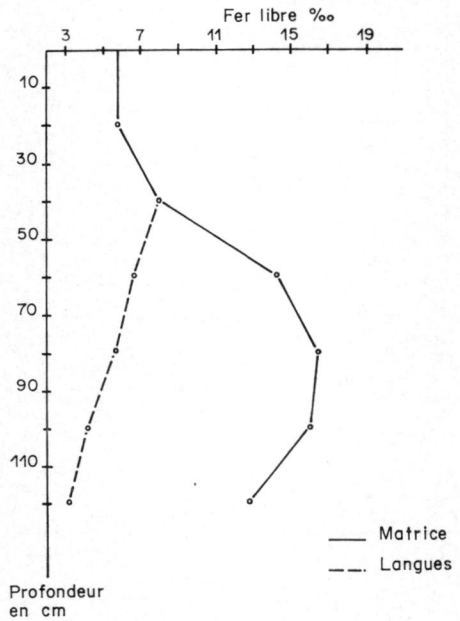


FIG. 5. — *Fer libre pour 1 000*

concrétions bien développés pouvant être friables. Plus profondément, s'observent des revêtements noirâtres sur les faces des agrégats, de nombreuses taches rouille dans la matière oxydée, au sein de l'horizon d'accumulation d'argile, et la présence de langues blanchies de couleur 10 YR 7/3 pénétrant dans une matrice oxydée de couleur 10 YR 5/6. Toutes ces particularités, signes de migrations du fer montrent l'importance prise par cet élément dans le développement du profil étudié.

A l'analyse, la matrice présente une nette accumulation de fer libre et de fer total au niveau de l'horizon B_{2t}, les indices d'entraînement étant égaux à 2,8 (fig. 5 et 6) ; dans les langues blanchies, par contre, les teneurs en fer libre décroissent régulièrement avec la profondeur et les teneurs en fer total sont nettement inférieures à celles obtenues dans la matrice. Le rapport $\frac{Fe_l.}{Fe_t.} \times 100$ permet de dissocier également matrice et langue (fig. 7).

4. 22. *Observations microscopiques.*

A la base de l'horizon A_{2g}, existent de gros nodules ferriques dont certains contiennent des fragments de ferriargilanes, témoins d'un horizon B_2 ; il semble donc

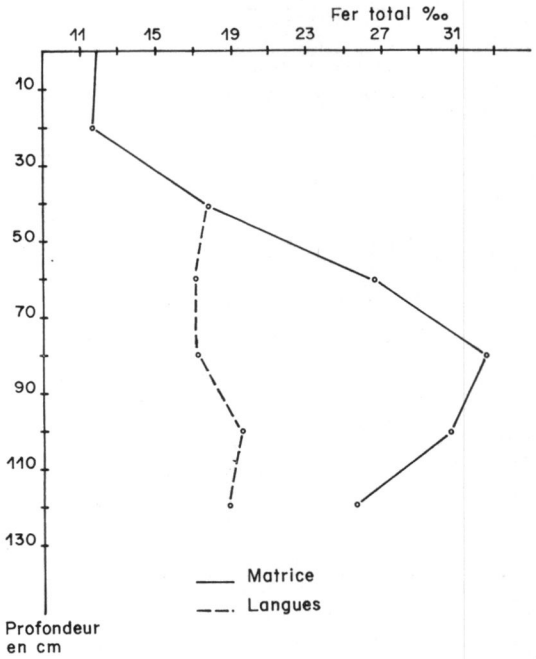


FIG. 6. — *Fer total p. 1 000*

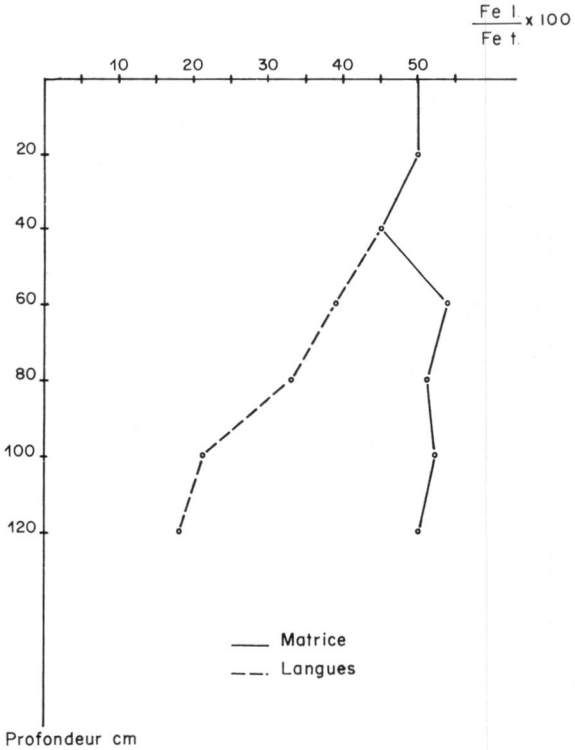


FIG. 7. — *Rapport fer libre/fer total × 100*

que ces nodules fossilisent des caractères d'un ancien horizon argillique ayant actuellement disparu.

Le fer, dans les horizons d'accumulation d'argile est présent :

— dans les ferriargilanes très nombreux et comblant les vides, répartis sur les surfaces des agrégats ou englobés au sein de la matrice ferrique,

— dans des concentrations du type « sesquanes » partiellement intégrés en position subcutanique ou répartis sur les parois des cavités et des fentes,

— dans des nodules ferriques englobant des ferriargilanes souvent fragmentés.

Au niveau du fragipan, le fer se répartit principalement dans les ferriargilanes associés à des sesquanes dans les zones ferriques ; les langues blanchies apparaissant comme déferrifiées.

Les divers dépôts d'oxydes de fer, dans ce profil, beaucoup plus complexes que ceux généralement observés dans un sol lessivé nous amènent aux remarques suivantes :

— il existe des traces d'un horizon B_{2t} fossile, à la base de l'horizon A_{2g} au sein des nodules ferriques,

— l'horizon B_{2t} présente de nombreux ferriargilanes et concentrations de type sesquanes,

— les langues blanchies pénétrant dans les horizons d'accumulation d'argile et au sein du fragipan sont déferrifiées.

4. 3. — *L'hydromorphie*

4. 31. *Observations macroscopiques.*

Quelques petites taches rouille de couleur 7,5 YR 4/4 et quelques petites concrétions apparaissent dès l'horizon A_{12} mais l'hydromorphie du profil se manifeste principalement dans l'horizon A_{22g}, soit vers trente-cinq centimètres, par la présence de grosses taches (7,5 YR 4/4), de concrétions noirâtres bien développées et d'un gainage des petites racines. Ce sol est caractérisé par un drainage faible (JAMAGNE, 1967) lié à l'influence d'une nappe perchée temporaire due à la présence d'un horizon d'accumulation d'argile situé entre 60 et 100 centimètres surmontant le fragipan à structure prismatique et dont la densité apparente atteint 1,8.

L'horizon B_{2t} est tacheté de zones rouille (7,5 YR 5/6) et grisâtres correspondant à des concentrations ou à un départ des oxydes de fer sous l'influence de l'hydromorphie.

4. 32. *Observations microscopiques.*

Les caractères hydromorphes se manifestent par :

— des nodules ferriques, situés à la base de l'horizon éluvial, fossilisant des fragments de ferriargilanes,

— des ségrégations différentielles des oxydes de fer, au sein de la matrice, visibles sous forme de taches rouille et de zones décolorées à limites diffuses.

L'hydromorphie entraîne la formation d'un milieu réducteur pouvant expliquer les comportements de l'argile et du fer : en milieu réducteur, les argiles de la matrice

ou de concentration plasmiques issues d'une évolution préalable en milieu aéré peuvent en effet être mises en suspension avec perte d'une grande partie des oxydes de fer absorbés avant de migrer (JAMAGNE et FÉDOROFF, 1969). Cette migration profonde s'effectue par la voie des fentes créées par la structure particulière de l'horizon B_{2t} et du fragipan de ce profil et se manifeste au microscope par la présence de revêtements argileux jaune-clair déferrifiés. Les argilanes jaune clair répartis en position subcutanique ou cutanique seraient donc dus à l'hydromorphie.

4. 4. — *La genèse du profil*

Ce profil de la forêt de Trois-Fontaines présente de nombreux caractères typiques des sols lessivés développés sur limon :

— présence d'un horizon d'accumulation d'argile en profondeur ; l'illuviation étant marquée par des revêtements argilo-ferriques très nombreux,

— indices d'entraînement d'argile et du fer supérieur à 2,

— désaturation marquée du complexe absorbant dans les horizons supérieurs,

— faible microporosité.

Surimposés au phénomène du lessivage, apparaissent des caractères particuliers, signes d'une évolution accentuée :

— présence de langues blanchies déferrifiées dans lesquelles les revêtements sont des argilanes jaune clair,

— existence d'un horizon, situé à la base de l'horizon d'accumulation argillique, caractérisé par une densité apparente élevée et une structure prismatique grossière,

— hydromorphie prononcée, témoin de la présence d'une nappe perchée temporaire à faible profondeur,

— nodules ferriques englobant des traces d'un horizon B_{2t} fossile,

— évolution très marquée dans le lessivage conduisant à une vermiculitisation de surface.

L'évolution d'un tel sol semble ainsi avoir dépassé le stade du sol lessivé pour atteindre un stade d'altération plus marqué : accumulation d'argile au sein d'un horizon B_{2t} et ferriargilanes seraient les témoins du stade « sol lessivé » alors que langues déferrifiées, vermiculitisation de surface représenteraient les effets d'une pédogenèse plus récente.

Les nodules ferriques, situés à la base de l'horizon éluvial, englobant des ferriargilanes preuves de la présence d'un ancien horizon B_{2t}, les ségrégations des oxydes de fer au sein de l'horizon B_{2t} et la vermiculitisation de surface avec accumulation d'interstratifiés vermiculite-montmorillonite en profondeur indiquent qu'il existe actuellement une dégradation de la partie supérieure et localement au sein de l'horizon B_{2t}. Le résultat final de cette dégradation est la migration profonde d'argile déferrifiée par la voie de chemins préférentiels dus à la macrostructure des horizons B (= argile d'illuviation secondaire), avec apparition de langues blanchies et dissolution de la partie supérieure de l'horizon B.

Cette migration d'argile s'explique par la présence d'une nappe perchée temporaire à faible profondeur ; le milieu réducteur ainsi créé peut permettre en effet la mise en suspension et la migration des argiles de l'horizon B_{2t} après perte d'une partie

des oxydes de fer (JAMAGNE et FÉDOROFF, 1969) sous forme de complexes ou chélates ferreux (BÉTRÉMIEUX, 1951 ; SÉGALEN, 1964).

La genèse du profil serait donc la suivante :

— désaturation du complexe absorbant et lessivage aboutissant à la formation d'un horizon d'accumulation d'argile et à une augmentation progressive de la compacité du matériau sous-jacent,

— apparition d'une nappe perchée à caractère temporaire en relation avec le tassement du fragipan et le colmatage des vides des horizons d'accumulation d'argile ; nappe créatrice d'un milieu réducteur permettant une ségrégation fer-argile et la migration d'une argile déferrifiée dans des chenaux préférentiels dus à la macrostructure ; dissolution progressive de l'horizon B_{2t} en sa partie supérieure et localement en taches, et création de poches et langues blanchies caractéristiques de l'approfondissement de l'horizon éluvial.

Ce profil se caractérise ainsi par deux pédogenèses successives, la première conduisant à une illuviation primaire, la seconde à une dégradation de l'horizon d'accumulation argillique ainsi créé avec approfondissement de l'horizon éluvial et création de langues déferrifiées, chemins préférentiels d'une illuviation secondaire actuelle.

4. 5. — *Extension. Répartition géographique*

Le type de sol que nous venons d'étudier, sol lessivé glossique à pseudogley, présente une extension importante sur matériau limoneux en Europe de l'Ouest.

Il a été décrit par divers auteurs dans des régions naturelles différentes et sur des matériaux d'origine variée : éolienne, fluviatile, de colluvionnement. Il s'agit très généralement de dépôts dont la mise en place est assez ancienne.

Ces sols se retrouvent aux Pays-Bas, au niveau de terrasses, ou développés dans des lœss typiques (BOUMA *et al.*, 1968-1969), en Belgique sur limons lœssiques décarbonatés et acidifiés (DUDAL, 1953), en Allemagne de l'Est (LIEBEROTH, 1963), en Allemagne de l'Ouest où ils sont considérés fréquemment comme « pseudogley secondaires ».

En France, ils se répartissent dans le Bassin de Paris où ils sont développés sur limons lœssiques relativement anciens (JAMAGNE, 1964-1967), en Lorraine (LE TACON *et al.*, 1971), dans le Sud-Ouest sur formations alluviales (BÉGON et JAMAGNE, 1971), ainsi que dans beaucoup d'autres régions naturelles où ces sols sont actuellement en cours d'étude.

L'extension importante de ces sols justifie donc une étude approfondie de leur genèse, de leurs propriétés et de leur utilisation.

V. — VALEUR AGRONOMIQUE ET CONDITIONS GÉNÉRALES DE MISE EN VALEUR DES SOLS LESSIVÉS GLOSSIQUES DE LA RÉGION

Dans le secteur de l'étude, les sols développés sur limons et parvenus au stade d'évolution de sols lessivés glossiques sont occupés en grande partie par des massifs forestiers et des prairies naturelles. Ceci traduit les difficultés rencontrées pour leur

mise en valeur, tant antérieurement qu'actuellement. Les conditions pédogénétiques ont en effet largement contribué d'une part, à l'appauvrissement chimique des horizons cultivés, conférant une forte acidité, et d'autre part, à une hydromorphie interne très prononcée en profondeur.

Au point de vue chimique, les conditions d'amélioration sont celles des sols acides en général. Pauvres en bases par suite d'une forte lixiviation des cations, ces sols peuvent être rapidement améliorés par chaulage, de préférence avec de la chaux magnésienne puiqu'ils sont pauvres naturellement en magnésium. Anciennement, certaines surfaces ont été marnées, et on retrouve souvent à l'analyse chimique les modifications de pH résultant de ces amendements calciques qui ne sont guère pratiqués de nos jours. Actuellement, lorsqu'ils sont cultivés, ces sols ont en surface un pH voisin de 6 ; un état calcique convenable paraît être maintenu par la fertilisation phosphatée calcique. Avec des fumures correctives, appliquées pendant trois ou quatre années consécutives, le niveau général de la fertilisation est satisfaisant.

Au point de vue physique, les difficultés sont plus sérieuses. Tout d'abord, on doit noter après quelques années de mise en culture un état structural assez déficient en surface, caractérisé par des phénomènes de battance. Ce problème est cependant classique en sols de limon ; il peut être résolu en améliorant l'état humique qui est toujours faible et en effectuant des rotations convenables. Mais le problème le plus marquant qui caractérise ces sols est l'excès d'eau en période hivernale. Lors de fortes pluies, les horizons profonds ne peuvent évacuer l'eau en excès et les horizons lessivés de surface sont fortement engorgés par réaction du substrat très peu perméable. Il en résulte que les cultures d'hiver peuvent courir des risques importants d'hydromorphie. Aussi de tels sols sont principalement réservés pour les cultures de printemps. En hiver sec, leur comportement est cependant bon et le développement ultérieur des cultures est excellent par suite d'une bonne réserve hydrique.

Convenablement fertilisés, les sols lessivés glossiques peuvent acquérir un potentiel agronomique élevé, sous réserve toutefois de pouvoir assurer la maîtrise de l'excès d'eau, principalement en hiver.

Une amélioration était apportée anciennement par la réalisation d'ados, mais leur efficacité est cependant limitée. Cette maîtrise de l'excès d'eau fait actuellement l'objet d'études de détail sur champs expérimentaux afin de déterminer des normes de drainage par tuyaux de poteries ou de plastique, relatives à la profondeur et à l'écartement des drains en fonction du type de profil concerné et principalement de la profondeur de l'horizon B_t.

Reçu pour publication en août 1972.

SUMMARY

STUDY OF A GLOSSIC LEACHED SOIL FORMED ON EOLIAN LOAM IN THE « TROIS-FONTAINES » FOREST (MARNE, FRANCE)

In the « Perthois Marnais » area, the presence of an eolian loam cover has lead to the formation of very developed soil profiles which reached the stade of glossic leached soil. To explain the genesis of these soils, a detailed study has been undertaken on the different horizons of a typical pro-

file through classical analytical methods on the one hand, through determination of clay minerals and micromorphological examination on the other. The loams seem to have undergone a desaturation of the exchangeable complex together with a leaching causing a primary illuviation. Then the clay horizon formed build up — temporarily hydromorphic conditions with reducing characteristics which result in a segregation between iron and clay. The top of the horizon set up by the primary illuviation finally weathered progressively whereas tongues of degradation, present seat of a secondary illuviation, spread out in depth. If the reclamation of these soils does not rise major problems as far as mineral fertilizing is concerned, their rational use remains closely linked with the water regime that only a correctly carried out drainage permits to master.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG EINES AUSGEWASCHENEN GLOSSISCHEN BODEN IM WALD TROIS-FONTAINES (MARNE BEZIRK-FRANKREICH) AUF DER EOLISCHER ABLAGERUNG GEBILDET

Im Gebiet um Perthois-Marnais hat eine Schicht eolisch abgelagerten Lösses die Entwicklung sehr verwickelten pedologischen Profile ermöglicht, die das Stadium eines ausgewaschenen glossischen Bodens erreicht haben. Um die Entstehung dieser Böden erklären zu können, wurde eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Horizonte eines typischen Profils mit Hilfe des konventionnellen analytischen Bestimmungsverfahrens unternommen, einerseits durch Bestimmung der Tonminerale und andererseits durch eine mikromorphologiqche Untersuchung. Allen Anschein nach sind die Lösschichten zunächst einem Entsättigungsvorgang des absorbierenden Komplexes mit Auswaschung unterzogen worden, welche eine primäre Illuviation (Wassereinbruch) hervorgerufen hat. Der so gebildete tonhaltige Horizont hat ein Medium mit vorübergehend hydromorphen Charakter und Reduktions-Eigenschaften geschaffen, welches die Abscheidung Eisen/Ton ermöglicht hat. Der Scheitel des Horizontes der primären Illuviation hat eine allmähliche Veränderung durch Verwitterung erfahren, während sich zungenförmige Verwitterungsausläufer nach unten entwickelten, die zur Zeit eine sekundäre Illuviation erfahren. Die Auswertung dieser Böden für den Ackerbau stellt keine wichtigen Probleme in Bezug auf die Fruchtbarmachung durch Minerale ; ihre zweckmässige Verwendung bleibt aber eng mit dem Wasserhaushalt verbunden, der nur durch eine fachkundig ausgeführte Entwässerung beherrscht werden kann.

РЕЗЮМЕ

Изучение вышелоченной почвы « глоссик » сформировавшейся на еоловом суглинке в лесах « Труа Фонтен ». (Департ. Марн).

Д. МАШИАН, П. ДЮТИЛЬ, М. ЖАМАНЬ.

Существование покрова на еоловом суглинке, привело к образованию в районе Пертуа Марнэ эрелых педологических профилей, достигающих стадии выщелоченной почвы « глоссик ». Чтобы попытаться об'яснить образование этих почв было предпринято детальное изучение различных горизонтов типичного профиля, с помощью классических аналитических приемов с одной стороны, определения глинистых минералов и и микроморфологических наблюдений, — с другой.

Выяснилось, что суглинки прошли сначала стадию полного рассыщения поглотительного комплекса, с выщелачиванием, вызвавшим процесс первичного иллювирования. Затем, образовавшийся глинистый горизонт создал среду с временной гидроморфностью восстановительного характера, позволившую отделение железо-глины. И наконец, вершина

горизонта первичного иллювирования прогрессивно изменилась, в то время как развивались вглубь языки деградации, служащие, в настоящее время местом вторичного иллювирования. Если мелиорация этих почв не представляет трудностей в плане минерального удобрения, их рациональное использование остается тесно связанным с водным режимом, управлять которым можно будет только после корректно проведенного оздоровления.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BEGON J.-C., JAMAGNE M., 1971. Sur la genèse de sols limoneux hydromorphes en France. *C. R. du Congrès de l'A. I. S. S.*, Stuttgart (sous presse).

BÉTRÉMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. agron.*, 193-295.

BOUMA J., PONS L., VAN SCHUYLENBORGH J., 1968. The formation of a glossudalf in loess. *Neth. J. Agric. Sci.*, **16**, 58-70.

BOUMA J., VAN SCHUYLENBORGH J., 1969. The formation of a glossaqualf in a silt-loam tenace deposit. *Neth. J. Agric. Sci.*, **17**, 261-271.

BREWER R., 1964. *Fabric and Mineral analysis of soils.* John Wiley and Sons Ed., London.

DUDAL R., 1953. Étude morphologique et génétique d'une séquence de sols sur limon lœssique. *Agriculture*, **1**, 2e série, 2, 119-163, Louvain.

HÉNIN S., AUBERT G., 1954. Relations entre le drainage, la température et l'évolution des sols. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **220**, 330.

JAMAGNE M., 1964. Introduction à une étude pédologique dans la partie nord du Bassin de Paris. *Pédologie*, XIV, 2, 228-342.

JAMAGNE M., 1967. *Bases et techniques d'une cartographie des sols. Ann. agron.*, **18**, 142 p. (hors-série).

JAMAGNE M., 1969. Données sur l'évolution pédogénétique des formations limoneuses en Europe occidentale. *Mém. H.-S. Soc. géol. Fr.*, 5, 37-52.

JAMAGNE M., FÉDOROFF N., 1969. Comparaison micromorphologique de quelques sols sur limon du Bassin Parisien. *Mém. H.-S. Soc. géol. Fr.*, 5, 73-79.

JAMAGNE M., 1970. Sur la mise en évidence d'une séquence d'évolution pédogénétique développée dans les formations limoneuses sous climat tempéré humide. *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **270**, 1773-1779.

LARUELLE J., 1958. Micromorphologie des sols de la Belgique. *Pédologie*, VIII, 79-102, Gand.

LARUELLE J., 1965. Notes on Soil Micromorphology. *Univ. Ghent. Intern. Train Center post. grad. Soil Scient.*

LE TACON F., HÉTIER J.-M., DUCHAUFOUR Ph., 1971. Note sur la Pédogenèse des sol lessivés à, pseudogley sur limons anciens des Basses-Vosges et de Lorraine. *C. R. du Congrès de l'A. I. S. S.* Stuttgart (sous presse).

LIEBEROTH I., 1963. Lossedimentation und Bodenbildung währen des Pleistozäne in Sachsen. *Geologie*, **12** (2), 149-187.

MAGNIANT D., DUTIL P., 1969. Les sols hydromorphes du Perthois marnais. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, 2, 19-30.

MAGNIANT D., DUTIL P., 1971. *Cartographie des potentialités des sols et de l'aménagement agricole du Perthois marnais.* Publ. Ronéo., Chamb. Agric. Marne et Station agron. Châlons/Marne.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 1, 13-49.

Ann. agron., 1973, **24** (2), 241-276.

PROGRÈS RÉCENTS CONCERNANT L'ÉTUDE DU SYSTÈME RACINAIRE DU BLÉ (*TRITICUM* SP.)

Ch. BALDY

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Après avoir passé en revue les techniques d'étude de l'enracinement, cette *analyse bibliographique* étudie la morphogenèse du système racinaire : effets génotypiques et phénotypiques et action des régulateurs de croissance.

L'influence des conditions de *milieu* sur la croissance des racines est analysée ensuite : état physico-chimique et climat du *sol* ; influence du climat *aérien* sur les organes souterrains. On souligne l'importance de l'aération et de la disponibilité instantanée en eau sur le développement des racines, comme aussi l'action des températures de l'air et du sol et du rayonnement solaire.

L'évolution des racines au cours du cycle végétatif du Blé est ensuite abordée. On étudie en particulier la densité d'occupation de chaque horizon, la notion de racine fonctionnelle, l'évolution du rapport *racines/parties aériennes*, en s'intéressant aux causes génétiques et écologiques de variation. On aborde enfin l'alimentation du système racinaire et on suggère, en conclusion, des orientations de recherches destinées à améliorer la productivité et l'efficacité du système racinaire du Blé.

INTRODUCTION

D'excellentes analyses bibliographiques concernant le système racinaire des Graminées ont été publiées depuis quelques années, par TROUGHTON (1957, 1962) notamment. PETERSON (1965) a présenté une monographie du Blé, qui renouvelle celles de PERCIVAL (1921) et d'AZZI (1927). BROUWER (1966) insiste particulièrement sur les aspects morphogénétiques de la croissance. Un symposium (WHITTINGTON ed., 1968) a été consacré à l'enracinement.

De nombreux travaux, postérieurs à 1968, ont renouvelé les connaissances, sur l'absorption des ions notamment. Leur abondance a obligé de faire un choix entre les

références, avec tous les risques que cela comporte, et on peut craindre que l'analyse souffre de lacunes. Les sources ont été diversifiées autant que possible en donnant la place qui leur revient aux travaux effectués en France.

Nous considérerons successivement : les techniques d'étude de l'enracinement, la morphogenèse du système racinaire, l'influence des conditions de milieu sur le développement des racines, leur répartition dans le sol et l'évolution du rapport racines/parties aériennes ; nous aborderons l'alimentation du Blé par son système racinaire, et chercherons pour finir à montrer l'état des connaissances et des lacunes en ce domaine.

I. — TECHNIQUES D'ÉTUDE DE L'ENRACINEMENT

Si l'étude des parties aériennes des plantes est relativement aisée, il n'en va pas de même des parties souterraines. Généticiens et écologistes n'en ont souvent qu'une connaissance imparfaite : beaucoup n'en tiennent aucun compte. On peut citer les monographies récentes de SCHUURMAN et GOEDEWAGEN (1965), STANKOV (1968), DELETANG (1969) et MAERTENS (1970). Les techniques peuvent être classées en *quatre* groupes :

1° *Le prélèvement en conditions naturelles* est simple dans son principe mais il faut beaucoup de main-d'œuvre pour avoir de bons renseignements. Il est utilisé depuis longtemps (PAVLYCHENKO, 1937 *a*). Des *monolithes* de dimensions diverses sont prélevés, mais NELSON et ALLMARAS (1969), WELBANK et WILLIAMS (1968) ont décrit des techniques de prélèvement mécanique de volumes unitaires voisins du mètre cube. Il est assez rare de pouvoir effectuer des prélèvements répétés, et les travaux non encore publiés de FAGGIOLI représenteront une contribution remarquable à cet égard.

L'étude se fait soit sur monolithes (MALET, 1971), soit à la tarière (qui ne permet pas une reconstitution aussi fidèle de la disposition des racines). Des horizons de 10 à 20 cm sont généralement prélevés. On lave les échantillons (HÉNIN *et al.*, 1969) et on recueille racines et débris organiques sur un filtre.

2° La technique d'observations en *place* est assez largement utilisée. Une graine est placée dans un vaste récipient empli de sol naturel contre une paroi vitrée, inclinée ou non (KMOCH *et al.*, 1957). On peut craindre une accumulation préférentielle des racines le long des parois, mais il semble que, moyennant nombre de précautions, on a une bonne idée de la *vitesse d'élongation* et de la répartition des racines dans un plan (ELLERN, 1968 ; MC ELGUNN et LAWRENCE, 1970). Mais ces récipients limitent souvent le développement latéral des racines. Des dispositifs perfectionnés, nommés « Rhizotrons » sont actuellement mis en place (ROGERS, 1969 ; SHIMURA, 1970 ; TAYLOR, 1969 ; TAYLOR *et al.*, 1970).

3° Les observations sont faites en *pots* dans plus de la moitié des études. D'utilisation aisée, cette technique permet de multiplier les informations, mais elle est critiquable à plus d'un titre. Trois procédés sont utilisés :

a) Pots remplis de *terre* reconstituée ou prélevée en monolithes. Les prélèvements échelonnés (de pots entiers en général) sont analogues à ceux de monolithes de sol

naturel ; selon les dimensions des bacs, le système racinaire aura une répartition normale, où s'accumulera le long des parois et du fond. Si la masse de *matière sèche* peut être correcte, absorption, aération, gradients thermique et hydrique sont complètement bouleversés, et la comparaison de la *dynamique* de la croissance en pots et en pleine terre reste discutable.

b) Pots emplis de *sable*, ou d'un mélange terre et sable ; les racines sont aisément séparées du sol. Le plus souvent les plantes reçoivent une solution nutritive. Cette méthode permet d'étudier en conditions standard les caractéristiques génétiques des systèmes racinaires (PINTHUS, 1967), mais ne permet d'avoir une connaissance précise ni de leur répartition dans le sol naturel, ni de leur répartition spatiale vraie, ni même de leurs caractéristiques réelles d'absorption ; leur développement dépend de la nature du substrat (MAERTENS, 1970).

c) Bacs de *solution nutritive* et cultures hydroponiques. Cette technique est très utilisée dans les études d'équilibre ioniques (car les compositions des solutions sont aisément modifiées), et aussi dans les études concernant la pression osmotique ; il s'agit souvent des premières phases de la croissance (HACKETT, 1968 ; TANAKA, 1971 ; HOMÈS et VAN SCHOOR, 1969). On sépare aisément racines séminales et coronales, ce qui permet de suivre leur évolution individuelle (BOATWRIGHT et FERGUSON, 1967 ; MAERTENS, 1970).

4° Il y a vingt-cinq ans environ que les *traceurs radioactifs* sont utilisés (I. A. E. A., 1965, 1967). Un grand nombre de caractéristiques du système racinaire ont été étudiées : profondeur statistiquement atteinte à une date donnée, en fonction des conditions de milieu ; activité de chaque élément de racine... *L'autoradiographie* permet de mettre en évidence les migrations et les zones les plus actives.

De nombreux corps radioactifs ont été utilisés, et en particulier ^{32}P, ^{86}Rb, ^{14}C ; plus rarement $^{3}H_2O$, difficile à éliminer, et ^{15}N, qui nécessite un spectromètre de masse.

L'interprétation des résultats d'échanges isotopiques sont à considérer avec *prudence*, car ils sont régis par des lois très différentes de celles qu'on se propose d'étudier ; on peut notamment avoir pénétration d'un élément, et échange isotopique entre la plante et le milieu, sans utilisation réelle par la plante (MAERTENS, 1972, comm. pers.).

Nous verrons dans les pages qui suivent plusieurs exemples d'utilisation (mais aussi les limites de signification) de ces techniques.

II. — MORPHOGENÈSE DU SYSTÈME RACINAIRE

A. — *Héritabilité du phénotype*

L'organisation générale du système racinaire est d'origine génétique : sa spécificité a permis de tracer des diagrammes de répartition dans le sol, et de publier des « Atlas des racines » (par exemple, KUTSCHERA, 1960). On pourra donc modifier par voie génétique le type d'enracinement, selon le but recherché (production de matière sèche totale, ou production maximale de grains par exemple), et les conditions édaphiques et climatiques (TROUGHTON et WHITTINGTON, 1968).

PINTHUS (1967, 1969) a mis en évidence l'héritabilité du caractère *angle d'ouverture* du système racinaire, en conditions standard, et le lien existant entre ce caractère et la résistance à la *verse physiologique*. CARLES *et al.* (1960) ont montré le rôle de l'équilibre glucides/azote en ce domaine, et GRIGNAC (1965) l'influence des caractères morpho-anatomiques et l'importance du diamètre moyen des racines. La résistance au piétin-verse dépend évidemment de gènes différents (DOUSSINAULT, 1970).

MONYO (1968) a étudié la localisation du caractère « vitesse d'élongation des racines », par substitution de chromosomes entiers : ainsi le chromosome 7B, qui gouverne aussi la précocité de la floraison, détermine le développement d'un faible enracinement. MAIA *et al.* (1967) poursuivent des études assez analogues. PUGSLEY (1971) a montré que le type de croissance « printemps » est lié à trois gènes dominants ; chacun peut inhiber la croissance hivernale, et le type « hiver » porte trois allèles récessifs aux trois loci. Il a trouvé aussi que les critères « nombre de feuilles », et « durée de la montaison » sont liés.

Le rythme d'absorption des ions par les racines est lié au génotype, comme l'ont montré (à l'aide de ^{32}P) STARZYCKY *et al.* (1964) sur Blé, KARIM *et al.* (1971) sur Riz et SCHIMANSKI et MARSCHNER (1971) sur Orge (à l'aide de ^{86}Rb) (1). Il en va de même de l'optimum de température de croissance de chaque cultivar, lié à son origine géographique (KOLDERUP, 1970).

B. — *Morphologie du système racinaire* (fig. 1 *a*)

a) *Le systéme séminal* provient de six primordiums différenciés dans le caryopse dont deux ou trois seulement se développent en général (GRIGNAC, 1965). Le caractère, stable pour un cultivar donné, est déterminé génétiquement (JANJATOVIC, 1968 ; TSIGANKOV, 1970). La vitesse de développement du système séminal varie avec le génotype (PAASIKALLIO, 1970). La profondeur atteinte est déterminée assez aisément à l'aide de ^{32}P, soit en excisant, soit en empêchant la croissance des racines adventives dès leur apparition.

En conditions standards de culture, PINTHUS et ESHEL (1962), TAVCAR et KENDELIC (1969) ont mis en évidence la corrélation étroite existant entre le développement à 14 jours et les caractéristiques de la plante adulte. PAVLYCHENKO et HARRINGTON (1935), PAVLYCHENKO (1937 *b*) avaient déjà souligné la corrélation positive existant entre le développement des racines séminales et le rendement. Leur développement est proportionnel à la température, et des sols chauds au moment du semis (20 à 25°C) sont donc favorables (TROUGHTON, 1962).

Les cultivars de type printemps ont généralement un système séminal relativement plus développé que ceux du type hiver (TROUGHTON, *loc. cit.* ; JANJATOVIC, 1968). Il peut disparaître au printemps, dans certains cas au moins, chez les Blés d'hiver (KMOCH *et al.*, 1957) ; son importance relative diminue en tous cas à mesure que le système secondaire se développe, et il ne représente que 5 p. 100 au plus à la floraison (TROUGHTON, *loc. cit.*).

b) *Le système secondaire* ou adventif, ou coronal, plus tardif, provient de primordiums situés à la base des deux premiers nœuds différenciés de la tige principale et des

(1) Il faut remarquer que la simulation de l'absorption du Potassium par ^{86}Rb exige des études préalables des rapports d'absorption K/Rb, variables pour chaque espèce et même avec l'*âge* des plantes.

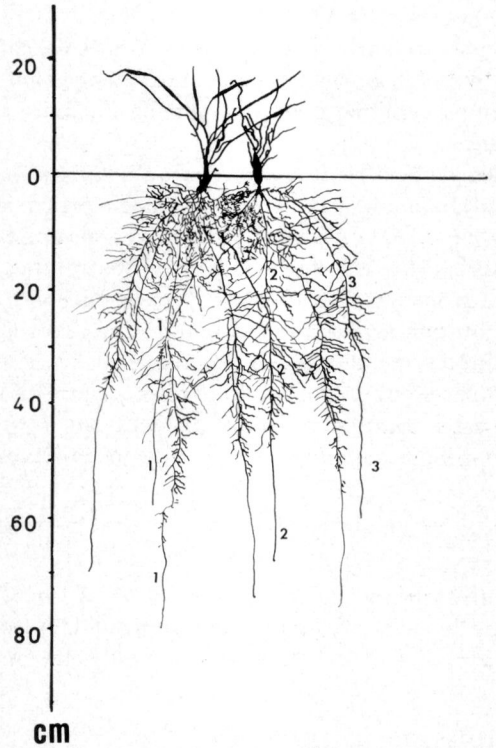


FIG. 1 *a*. — *Profil schématique de l'enracinement de deux plants de Blé tendre de printemps* (Rex) *dans un peuplement*

Observations personnelles, au début de la montaison en 1971
1, 2, 3 : individualisation de trois racines coronales

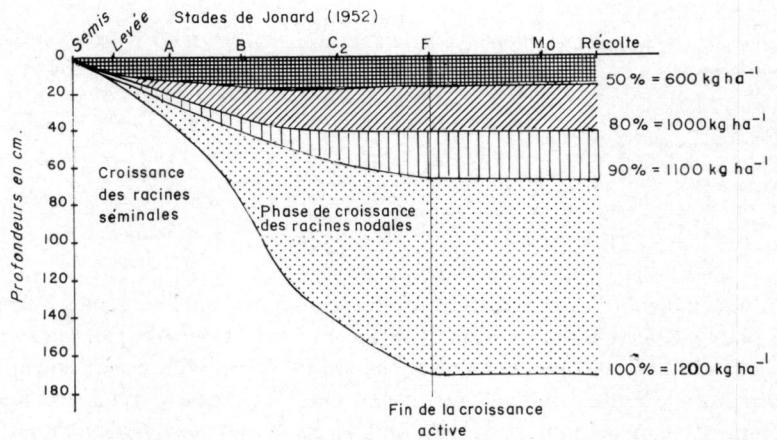


FIG. 1 *b*. — *Évolution de la masse sèche et de la profondeur d'enracinement d'un Blé tendre de printemps au cours de sa croissance*

(Inspiré de SINGH et DASTANE, 1970)

talles, Ces racines sont situées à la base de chaque feuille, et des deux côtés de chaque bourgeon latéral (PERCIVAL, 1921).

Nombre des racines adventives et bourgeons formés au cours du tallage sont en liaison étroite. BROUWER (1966) souligne que le développement rapide des graminées annuelles de printemps explique que leur système racinaire soit moins important que celui des graminées d'automne.

Des racines nodales peuvent se développer jusqu'à la floraison à condition qu'elles aient été *initiées* avant la montaison. Leur morphologie évolue avec l'âge de la plante à leur initiation (PINTHUS, 1969). Les racines tardives sont moins remarquables chez le Blé que chez le Maïs ; elles existent généralement (SCHUURMAN et KNOT, 1970), mais ne se développent souvent pas. NITTER (1971) a constaté des différences variétales importantes d'implantation sur les premiers nœuds de l'Avoine.

Le développement des racines nodales est favorisé par des températures de l'ordre de 10 à 15°C (TROUGHTON, 1962), un sol humide en surface (PAVLYCHENKO, 1937 *b*) et une photopériode assez courte (SCHEIBE et ELLERMANN, 1967). Ceci est en corrélation avec le développement abondant de bourgeons de tallage (PINTHUS, 1969) (fig. 1 *b*).

c) *Les racines latérales*, secondaires et tertiaires, se développent sur les racines séminales et nodales.

On peut représenter schématiquement cet ensemble, d'après BARLEY (1970) (fig. 2). Un très grand nombre de racines latérales se développent dans les horizons superficiels ; leur diamètre varie peu, de la base à la pointe ; des radicelles et des poils absorbants,

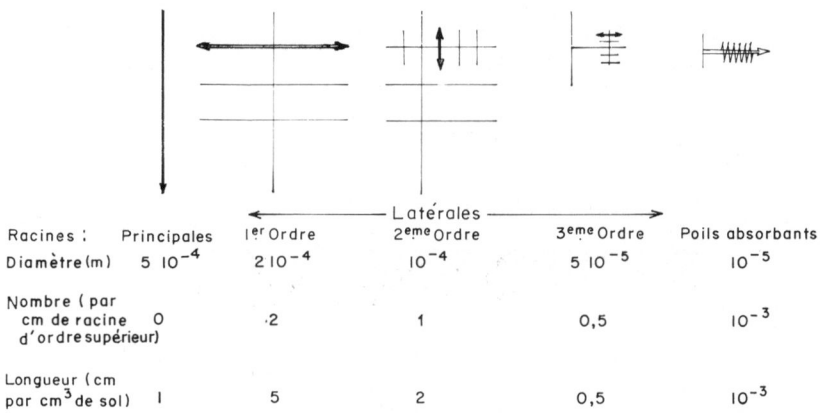


FIG. 2. — *Distribution et fréquence des racines des divers ordres chez le Blé*

actifs au voisinage de l'apex, existent en grand nombre sur les racines latérales. Ces derniers peuvent persister ou non, mais leur vie paraît brève. Mc ELGUINN et HARRISON (1969) ont constaté que leur activité se réduit deux jours après leur apparition.

Les racines latérales prennent de plus en plus d'importance relative à mesure que l'enracinement se développe. SCOTT-RUSSEL et SANDERSON (1967) ont montré qu'en pots on arrive à la répartition suivante par plante : 4,20 m de racines séminales, 3,80 m de racines nodales et 48 m de racines latérales ; mais ces longueurs sont plus faibles que celles obtenues en pleine terre, voisines de 100 à 300 m.

C. — *Action des régulateurs de croissance sur l'enracinement du Blé*

Un grand nombre de travaux a été consacré à ce sujet depuis une dizaine d'années ; on renvoie à la monographie de HUMPHRIES (1968). L'action des régulateurs sur l'enracinement est moins étudié : poids et diamètre moyen des racines de Blé sont accrus par le CCC (chlorure de chloro-choline) (ZEMANEK, 1971) ; HANUS (1970) a fait varier les doses et les périodes de traitement : le poids de racines à l'épiaison (1 900 kg ha^{-1}) est plus élevé que celui du témoin (1 200 kg ha^{-1}) ; mais ces différences disparaissent à la maturité, soit que le traitement réduise la durée de vie moyenne des racines après la floraison, soit que les migrations vers les organes de réserve soient plus efficaces. HUMPHRIES *(loc. cit.)* signale que CCC améliore les migrations des feuilles vers les épis et AVUNDZHJAN et SHIRAKJAN (1970) qu'il modifie la répartition des acides aminés entre racines et parties aériennes du Blé.

Il est impossible de citer ici toutes les substances régulatrices essayées. Notons simplement l'action positive de l'acide ascorbique vis-à-vis de l'« endurcissement » par le froid du Blé d'hiver. L'ethrel, l'acide gibérellique, et de nombreux autres produits ont des actions analogues, variables selon les cultivars et les conditions climatiques (EL-FOULY *et al.*, 1970 ; USKOV et PYATYGIN, 1969).

Les effets du CCC et des autres régulateurs facilitent la germination du Blé en sol salé ; mais leur effet est de courte durée (DARRA *et al.*, 1970 ; LAURA et IDNANI, 1971 ; NAQVI *et al.*, 1970).

D. — *Conclusion*

On constate que le système séminal du Blé est important en début de croissance et que le système coronal le supplante progressivement, en particulier chez les Blés d'hiver. Le développement des racines est directement sous l'influence du génotype mais les conditions de milieu peuvent modifier l'*importance relative* des différentes racines, ce qui peut être d'un grand intérêt dans le cas du Blé, car l'environnement ne joue pas de la même façon sur des génotypes différents. Des traitements chimiques peuvent également induire des modifications du développement des racines et avoir une action sur leur efficacité.

III. — CONDITIONS DE MILIEU ET CROISSANCE DES RACINES

Beaucoup d'auteurs se sont intéressés à l'influence du milieu sur la croissance et le développement du système racinaire ; mais la moitié au moins des références se rapportent à des essais en pots. Dès 1937, SANDE-BAKHUYZEN a consacré une monographie à l'enracinement en conditions contrôlées. Des données récentes ont enrichi l'analyse de TROUGHTON (1962). Nous verrons successivement l'influence des conditions édaphiques et du climat aérien sur l'enracinement.

A. — *Conditions édaphiques*

a) *État physico-chimique du sol.*

α) *La densité apparente* influe sur la pénétration des racines. VOORHEES *et al.* (1971) ont montré, en utilisant des agrégats artificiellement compactés, que l'enracinement ne se développe plus guère quand la densité apparente dépasse 1,8 kg m^{-3},

alors que sa croissance est normale à 1,4. Pour SHARMA *et al.* (1971), travaillant sur des sols argileux tropicaux, le Blé ne s'enracine normalement qu'à des densités apparentes inférieures à 1,3 dans les 13 premiers centimètres : avec 1,1 en surface (0-13 cm) et 1,3 au-delà, sa croissance est optimale. Par contre, l'enracinement décroît proportionnellement à la densité, pour s'annuler quand celle-ci passe de 1,34 à 1,55. Pour VOORHEES *et al.* (*loc. cit.*), IVANOV (1971), SUSKEVIC et STRANAK (1970), la taille des pores, inversement proportionnelle à la densité apparente, joue un rôle fondamental : les racines ne peuvent développer de manchons de poils absorbants qu'à condition de croître dans des interstices suffisants. Ceci explique les observations selon lesquelles on a beaucoup plus de poils absorbants dans le sable grossier. On verra que *la vitesse instantanée* d'alimentation en eau des racines peut aussi jouer un rôle (chap. 5).

Les systèmes de labours ou de non-culture peuvent améliorer (au moins temporairement) la densité apparente. Cette question a fait l'objet d'une mise au point récente (HÉNIN *et al.*, 1969).

MAERTENS (1970) trouve de très grandes différences dans le développement et la structure du système racinaire du Blé au tallage selon le type de sol ; le diamètre moyen des racines secondaires passe de 0,3 mm en sol argileux à 0,2 mm en sol sableux, et les racines tertiaires de 0,24 à 0,12 mm (tabl. 1).

TABLEAU I

Développement au tallage des racines de blé dans 3 sols d'après MAERTENS (1970)

Type de sol	Longueur totale de racines (mm)	Dont racines secondaires et tertiaires	Surface absorbantes (mm^2)
Argileux	2 500	2 300	2 300
Limoneux	10 300	9 300	7 600
Sable d'alluvion	17 500	16 500	11 600

β) *La salinité du sol* ou de l'eau d'irrigation et les problèmes qui y sont liés (pH et aération du sol, modifications de la structure des argiles) influent sur l'enracinement et de très nombreuses études y sont consacrées.

Ainsi LAURA et IDNANI (1971) ont montré en pots l'action de chacun des principaux sels (Na_2CO_3 ; $NaHCO_3$; NaCl ; Na_2SO_4) à trois doses, avec et sans fumier de ferme : les carbonates sont beaucoup plus nocifs que les chlorures ; les sulfates (à 0,6 p. 100 en poids dans le sol), n'ont pas d'action dépressive ; l'apport de fumier permet de limiter un peu la nocivité des autres sels. AUBERT et OLLAT (1969), MALET (1969, 1971), parmi beaucoup d'autres, ont présenté des résultats intéressants à ce sujet.

D'autres éléments, comme l'aluminium, réduisent la croissance des racines. L'action diffère avec les cultivars (KERRIDGE *et al.*, 1971). Soulignons que cette remarque vaut pour tous les travaux traitant de l'action de la salinité sur le Blé ; la résistance est un caractère variétal, génétique ou parfois cytoplasmique. On connaît les effets antagonistes du calcium et du sodium ; un excès de Ca peut bloquer

l'absorption de différents éléments (fer, cuivre, par exemple), mais la croissance des racines est inhibée par une carence en calcium (ABUTALYBOV, 1964 ; GERARD, 1971 ; TANAKA, 1971).

La croissance des radicelles en conditions salines est perturbée (GAIDAMAKINA, 1969 ; UDOVENKO *et al.*, 1970). On peut rapprocher ceci du faible volume de racines constaté par MALET (1971) en Tunisie en sols salés. La salinité se traduit par une réduction de la croissance en longueur de chaque racine et par un développement important de poils absorbants.

ABUTALYBOV et MARDANOV (1967), KREEB et ABDELALL (1970), OLEINIKOVA et KOZHUSHKO (1970) ont mis en évidence l'action directe de la pression osmotique. On citera particulièrement le travail de GERARD (1971), qui a comparé l'effet de solutions salines et de polyéthylène glycol sur les racines.

b) *Climat du sol.*

α) *L'eau du sol* est l'élément fondamental de la croissance. Le sol constitue le réservoir essentiel de la plante, mais l'étude de sa capacité de stockage sort de notre propos.

La disponibilité en eau instantanée au niveau des racines agit sur leur développement. Un déficit hydrique du sol (de 1 à 5 atm au plus) *en début de végétation* est favorable : on constate un approfondissement rapide des racines dans des sols sableux peu humides à l'automne (KMOCH *et al.*, 1957), avec de grandes différences dans le comportement des divers cultivars. La progression de l'enracinement est liée au potentiel matriciel. Elle suit le front d'humectation du sol, mais avec de fortes variations entre cultivars : par exemple *Koga 2* croît bien en sol humide et souffre beaucoup de la sécheresse, alors que *Thatcher* croît bien en sols peu humides. SINGH et DASTANE (1970) arrivent aux mêmes conclusions sur blés semi-nains que HURD (1964, 1968). La croissance des racines est maximale entre 5 et 10 atm., et ne cesse qu'au-delà de 25 atm. (SALIM *et al.*, 1965 ; YANG, 1971 ; YANG et JONG, 1971).

Une préirrigation d'automne modifie les conditions de croissance des racines au printemps (KMOCH *et al.*, *loc. cit.*). Elles se développent d'autant plus qu'une fertilisation azotée importante est donnée. En climat méditerranéen, avec un sol salé, de fortes pluies et une croissance hivernale notable, une préirrigation faible (fig. 3) favorise le développement radical (MALET, 1971).

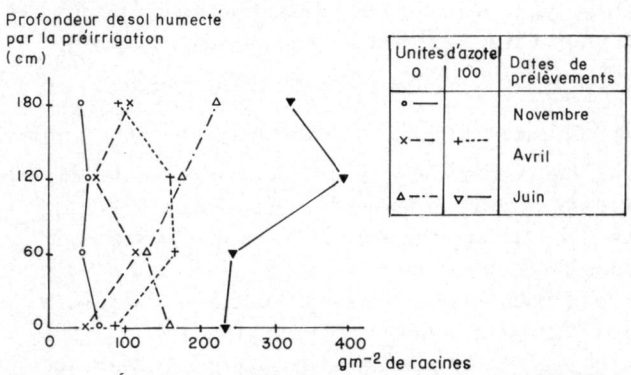


FIG. 3. — *Évolution du poids sec total des racines pour un Blé d'hiver en fonction de l'importance de la préirrigation et de la fertilisation azotée* (KMOCH *et al.*, 1957)

Un déficit hydrique important au tallage réduit la croissance des racines adventives de la plante (DAY et INTALAP, 1970) ; la sécheresse du sol en surface peut bloquer leur développement (BOATWRIGHT et FERGUSON, 1967) sans modification notable de la turgescence apparente des feuilles (FISHER et KOHN, 1966). De fortes humidités peuvent réduire aussi la croissance des racines. Un sol argileux a une conductivité capillaire plus faible qu'un sol limoneux à humidité élevée ; ceci est lié à la structure du sol (HALLAIRE et BALDY, 1964).

β) *L'aération du sol* semble plus ou moins confondue parfois avec la densité apparente et la vitesse circulatoire dans les capillaires du sol. Elle est liée à la vitesse de renouvellement de l'oxygène du sol. Plusieurs auteurs travaillent actuellement cette question, en solutions nutritives (Mme PÉRIGAUD, 1967) ou sur sols (CAMPBELL et FERGUSON, 1969 ; VARADE *et al.*, 1970). Ils montrent l'interaction du climat aérien, de l'alimentation du sol en eau, de l'aération de ce dernier, et leurs effets combinés sur la croissance des racines.

On a constaté *sur d'autres espèces que le Blé*, il faut le noter, (GREENWOOD, 1971) des modifications de composition biochimique en solutions mal aérées. La teneur en eau des parties aériennes varie peu, mais on constate une réduction de leur croissance. Une tension partielle minimale d'oxygène est nécessaire dans la racine même (FISCUS, 1970) ; en son absence, des processus anaérobies se développent (GORDON et BICHURINA, 1970 ; VARTAPETIAN, 1970) et provoquent une consommation d'eau élevée par unité de matière sèche produite (VARADE *et al.*, 1970). Mc INTYRE (1970) a présenté une étude critique de la microsonde de platine utilisée pour mesurer l'aération du sol, et des problèmes d'étalonnage qu'elle pose en sols désaturés. Des études complémentaires paraissent encore nécessaires, avant d'élucider tous les mécanismes induits par le manque d'oxygène dans le sol.

γ) *Rôle de la température sur la croissance racinaire.* On connaît mal la dynamique de son action, sauf pendant la germination et le tallage : la plupart des résultats disponibles ont été obtenus en chambres de culture, sans variations progressives des conditions thermiques, et le plus souvent sans mesure du gradient existant entre la surface et le fond des cuves.

— *Température de germination.* — GESLIN (1944) a montré que la germination du Blé peut se produire dès que les températures sont positives, et que la somme des températures nécessaire à l'apparition de 50 p. 100 des plantules est voisine de 40°C. jours. On a, entre 0 et 25° au moins, la relation :

$$x \cdot y = \text{Cte} \quad (x \text{ en } ^\circ\text{C}, \ y \text{ en jours})$$

On constate que plantule et radicule ont le même rythme de croissance.

Pour la levée (apparition de 50 p. 100 des coléptiles de blés semés à 5 cm de profondeur), GESLIN a trouvé la même loi, mais avec $x \cdot y = 122$ degrés·jours. Des blés nains soumis à des températures élevées (25°C) ne parviennent à germer que s'ils sont semés à moins de deux centimètres dans le sol (ROY *et al.*, 1970) : la respiration intense à cette température consomme rapidement les réserves. Ni le coléoptile, ni la radicule ne parviennent à se développer suffisamment.

GRIGNAC (1965) a vérifié la relation trouvée par GESLIN, dans le cas des Blés durs (*Triticum durum* DESF.). D'autres auteurs (WHITFIELD et SMIKA (1971) par exemple) permettent de généraliser cette donnée.

— *Température du sol et vernalisation des Blés d'hiver.* — Dans les conditions normales de semis, températures et photopériode décroissent durant l'automne ; ceci induit un « endurcissement au froid » du Blé dû à des modifications cytoplasmiques. METCALF *et al.* (1970) ont montré que la résistance au froid des racines est d'autant plus grande que la teneur en eau de la plante au moment où les basses températures surviennent est plus faible (voisine de 75 p. 100). LEFORT et SÉBILLOTTE (1968) avaient déjà mis en évidence l'aggravation du risque de gel complet de la plante quand une vague de froid survient brusquement.

Des températures du sol supérieures à 13°C peuvent empêcher cette induction de se produire. Ce phénomène est fréquent en climat méditerranéen tempéré. Il est étroitement lié au degré d'alternativité de la variété (DREZGIC *et al.*, 1969 ; HALSE et WEIR, 1970). Des températures supérieures à 20°C peuvent provoquer la *déverna-lisation* du blé (FRIEND et PURVIS, 1963), ce qu'on peut éviter en prolongeant de 7 à 15 jours la période de vernalisation artificielle.

— *Température du sol pendant les phases de développement.* — Comme TROUGHTON (1962) le faisait remarquer, on possède peu de renseignements sur les effets des températures du sol après le tallage. Au printemps, le sol s'échauffe plus rapidement en surface qu'en profondeur. On connaît mal l'effet de ce gradient thermique sur le développement des racines ; des études de dynamique de la température dans des matériaux poreux existent, mais leur application biologique fait défaut. KOROVIN et ZHUCHILIN (1969) ont montré qu'un refroidissement intense du sol (— 10°C) peut ne pas avoir d'effets trop défavorables sur blés de printemps, si une partie seulement du système racinaire est soumise à ces conditions. Ceci peut se produire si le sous-sol est moins froid que la surface. GESLIN (1944) avait déjà montré que le refroidissement du sol pendant la montaison améliorait la fertilité des épis par rapport au témoin. La résistance interne de la plante au flux d'eau diminue quand la température des racines augmente (YANG, 1971), et la vitesse d'absorption des ions est généralement plus grande quand la température croît (BOATWRIGHT, 1971). Ce dernier constate aussi que des températures suboptimales ne modifient pas la croissance des racines, en chambre de culture. Il est curieux de constater que l'action du géomagnétisme a apparemment été plus étudiée que celle du gradient thermique dans le sol.

Des températures élevées (27 à 32°) pendant les premiers stades de croissance ont un effet défavorable sur l'allongement des racines (OWEN, 1970) ; leur optimum est situé entre 5 et 20° (WHITFIELD et SMIKA, 1971), en fonction du stade de développement et de l'origine géographique. On constate une diminution rapide à partir de 25° (TROUGHTON, 1962 ; DREZGIC, 1969 ; TIWARI *et al.*, 1970) en conditions tropicales. La culture du blé en région tropicale est particulièrement influencée par les températures élevées, la saison « froide » étant souvent trop brève.

GESLIN (1944) avait déjà prouvé que le chauffage du sol pendant la montaison, en modifiant l'équilibre des températures des racines et des parties aériennes, était défavorable au développement de l'épi ; cet effet est à rapprocher de celui d'un ombrage, qui se traduit par une production relative plus importante des parties aériennes (TROUGHTON, 1962 ; PENDLETON et WEIBEL, 1965). OSMAN (1971) et VARADE *et al.* (1970) ont montré que plus la température du sol s'élève, meilleures doivent être l'aération et l'alimentation instantanée en eau de celui-ci. Dans de telles conditions, la vitesse de développement des racines croît jusqu'à 25°C. Mais cet

équilibre est difficile à maintenir en conditions naturelles. On observe des variations considérables entre cultivars (NITTLER, 1971) : la respiration des racines croît proportionnelement à leur température, mais leur optimum est lié à leur origine géographique (KOLDERUP, 1970). Nous retrouverons ce problème à propos de la photosynthèse (BALDY, 1973 *a*).

Après la montaison, la plupart des résultats concernent les températures de l'air ; on les verra au paragraphe suivant. WHITFIELD et SMIKA (1971) ont cependant noté l'effet défavorable de basses températures ; l'optimum est voisin de 18°C. Mais on ignore, par exemple, l'effet que pourrait avoir un sol régulièrement refroidi par des eaux d'irrigation de fonte de glacier (cas assez fréquent en zone aride), quand les parties aériennes supportent des températures de l'air élevées durant la journée.

B. — *Influence du climat des parties aériennes sur la croissance des racines*

Température, lumière et photopériode, précipitations et variations du déficit hydrique de l'air sont les facteurs les mieux étudiés. KHALIL (1956) a présenté des résultats remarquables obtenus en conditions contrôlées.

a) Dès l'apparition du coléoptile au-dessus du sol, *la température* de la plante peut être influencée par celle de l'air ambiant. Dans le cas de blés d'hiver, son action est particulièrement importante : chaque fois qu'un coup de froid brutal survient sans que la plante ait le temps de modifier son équilibre interne pour parvenir à un état d'endurcissement (VINCENT et GOUJON, 1964), on note un brusque arrêt de croissance des parties souterraines et le déclenchement de phénomènes irréversibles bloquant leur développement ultérieur. LEFORT et SÉBILLOTTE (1968) après DIEHL (1952) en ont analysé les conséquences : les racines nodales ne peuvent se développer car les initiales des bourgeons de tallage sont détruites et le volume des racines et des parties aériennes des plantes survivantes s'en ressent fort. Inversement, un brusque coup de chaleur survenant à la fin de l'automne peut faire réapparaître la sensibilité au froid (FRIEND et PURVIS, 1963). METCALF *et al.* (1970) ont montré que des teneurs en eau très élevées dans la plante au début de l'endurcissement, rendent celui-ci plus difficile, ce qui peut bloquer le développement ultérieur de racines coronaires par destruction d'initiales.

Si un « coup de froid » survient, la résistance propre des Blés de printemps est très limitée et leur croissance définitivement réduite, car l'allongement de la photopériode réduit la durée de chaque phase (KOROVIN et ZHUCHILIN, 1969). Ceci entraîne une diminution des racines nodales (STREBEYKO *et al.*, 1963, 1967).

Des températures élevées (TIWARI *et al.*, 1970) et des précipitations déficitaires au printemps (KMOCH *et al.*, 1957) provoquent une réduction rapide des réserves en eau du sol, et sont défavorables au développement des racines et des organes reproducteurs (KHALIL, 1956 ; LYAPSHINA, 1967 ; KIZITSHENKO *et al.*, 1970). On a vu plus haut que l'aération déficiente du sol peut en être la cause (VARADE *et al.*, 1970).

b) *La lumière* peut agir par son *intensité* (énergie) ou sa *durée* (photopériode) sur la croissance des racines.

En début de végétation, une grande partie des assimilats migre vers les racines. La quantité d'énergie absorbée par la plante est limitée par son faible développement aérien. Dans le cas des Blés d'hiver, la photopériode décroissante induit une réduc-

tion de la photosynthèse (à énergie et température constantes) et paraît agir sur le phénomène d'endurcissement (BABENKO et INKINA, 1970).

Les Blés de printemps poussent en photopériode croissante. En début de végétation, le développement de leurs racines est directement proportionnel à l'énergie incidente, et il peut être très rapide si les autres conditions ne sont pas limitantes. Dès la différenciation de l'épi du brin maître, la photopériode intervient. Son effet dépend d'ailleurs de l'origine géographique des Blés (VAN DOBBEN, 1965).

En accélérant les phases de développement (à température et énergie constantes), la photopériode bloque le développement de nouvelles racines (SCHEIBE et ELLERMANN, 1967). L'initiation de celles-ci s'arrête en effet dès que les organes floraux se différencient sur chaque talle (ASPINALL, 1961). On a mis en évidence aussi un blocage par corrélation des talles les plus tardives, et FRIEND *et al.* (1967), WILLIAMS et WILLIAMS (1968) ont montré que la plupart des initiales tardives de racines avortent.

c) Le développement des racines est lié à la *disponibilité en eau* à chaque instant (LOMAS et SHASHOUA, 1970). On a vu que des pluies d'automne abondantes sans excès (ou une préirrigation) favorisent l'enracinement du Blé (fig. 3) ; mais celui-ci peut être asphyxié à la levée par des pluies ou par une salinité excessives (MALET, 1971) ; les réactions des différents cultivars au déficit hydrique sont très variées durant cette phase (OLEINIKOVA et KOSHUSHKO, 1970). Dans les zones à hiver doux et sec (Argentine, Australie, par exemple), l'enracinement peut être perturbé par des périodes sans pluie, car l'évapotranspiration reste assez élevée. Un hiver froid et sans neige peut compromettre le Blé (CENOV, 1965) ; la neige est favorable au développement printanier des racines : on remarque que les rapports racines/parties aériennes sont plus élevées en climat de type continental froid qu'en climat méditerranéen ; génotypes et conditions de milieu jouent dans le même sens. L'eau de fusion de la neige est très aérée, et elle s'infiltre lentement, presque sans perte ; elle renouvelle l'atmosphère du sol, mais maintient longtemps celui-ci au voisinage de 0°C. Il semble cependant que la croissance des racines en est peu affectée.

d) Les effets de températures élevées et *de déficits de saturation de l'air* importants sont souvent mal distingués. Il semble bien que ces derniers entraînent une réduction de la croissance de l'ensemble de la plante en déséquilibrant celle-ci au niveau cellulaire : la demande peut excéder l'offre du sol pendant plusieurs minutes, et le métabolisme des racines peut en être modifié, et notamment provoquer une sénescence accélérée. Ces phénomènes apparaissent « en filigrane » dans beaucoup de travaux (ASANA et WILLIAMS, 1965 ; GESLIN et JONARD, 1948 ; OWEN, 1970 ; UGLOV et VOLKOVA, 1970, par exemple), mais nous ne connaissons pas d'étude spéciale de ce problème.

e) *En conclusion*, les conditions édaphiques influent beaucoup sur l'enracinement : la densité apparente, prise en valeur absolue, peut varier beaucoup selon les constituants du sol et la salinisation de celui-ci, sans que la réponse des racines varie beaucoup, et des densités voisines peuvent avoir un effet tout différent (BATCHELDER, 1971). Le climat du sol a un rôle fondamental dans le développement des racines. A mesure que la température du sol s'élève, les limites de croissance deviennent plus étroites, et l'aération (et l'oxygénation en particulier) constitue un facteur plus limitant, surtout en présence de sels. Le pH et la pression osmotique propres de la solution du sol ont un effet plus considérable qu'on ne le pensait autrefois.

La disponibilité instantanée en eau du sol est limitée par sa texture, la teneur en sels de la solution, la densité de racines par unité de volume de sol, et bien entendu par le rythme de réalimentation par la pluie (ou l'irrigation) du terrain.

On constate une évolution avec le stade phénologique de la culture, et en particulier avec le développement du système nodal : un léger déficit hydrique favorise le développement en profondeur du système séminal à la levée. Après le tallage, sa croissance est réduite dès qu'un déficit notable apparaît.

Pour que les racines de Blé croissent, il suffit que la température du sol soit positive, et on peut traduire ceci *en sommes de températures*. Mais la croissance sera meilleure si la température moyenne du sol (au niveau des racines) est inférieure à celle de l'air (conditions qui se rencontrent normalement au printemps). Il ne faut pas cependant que l'écart soit trop grand, car l'alimentation en eau de la plante peut en souffrir.

La lumière agit par induction photosynthétique, mais aussi par la quantité d'énergie disponible ; les migrations vers les racines sont sous sa dépendance directe ; dès que l'énergie devient insuffisante, l'alimentation des racines est réduite plus que celle du reste de la plante.

IV. — ÉVOLUTION DU SYSTÈME RACINAIRE ET DU RAPPORT RACINES/PARTIES AÉRIENNES AU COURS DE LA VIE DU BLÉ

On a vu les difficultés auxquelles on se heurte dans l'étude de la dynamique de la croissance des racines. Celles-ci dépassent souvent 2 m de profondeur, et peuvent atteindre 4 m sous blés d'hiver (KMOCH *et al.*, 1957 ; KAZAKHOV et GUSTAL, 1968). Des différences très importantes, d'origine génétique, existent entre blés d'hiver et de printemps (HACKETT et STEWART, 1968 ; PINTHUS et ESHEL, 1962 ; TROUGHTON et WHITTINGTON, 1968 ; WATSON *et al.*, 1963, etc.), et entre blés « nains » et « élevés » (NEWBOULD *et al.*, 1969 ; VARADE *et al.*, 1970).

Le système de culture modifie l'importance du système racinaire dans la couche travaillée (HÉNIN *et al.*, 1969). Mais il a peu d'influence sur la profondeur d'enracinement elle-même, liée à la structure et aux propriétés physico-chimiques du sol, et conditions climatiques (MAERTENS, 1970). On a vu que la présence d'un horizon saturé ou salinisé, ou une couche réductrice (dépourvue d'oxygène par conséquent) peuvent bloquer la progression du système racinaire en profondeur. Des conditions de croissance défavorables peuvent parfois induire un développement considérable des poils absorbants (TANAKA, 1971), si la densité apparente du sol ou la solution nutritive les favorisent (YANG et de JONG, 1971 ; VOORHEES *et al.*, 1971 ; SHARMA *et al.*, 1971).

A. — *Répartition des racines dans le profil*

a) *Densité d'occupation du sol.*

Un champ de blé en zone tempérée compte généralement 100 à 300 pieds par mètre carré, répartis en lignes espacées de 15 à 25 cm. Chaque pied dispose théoriquement d'un *rectangle* de 10^{-1} à $3 \cdot 10^{-3}$ m². Des racines peuvent atteindre et dépas-

ser deux mètres, mais l'occupation du sol n'est intense que sur 0,20 à 0,30 m.

D'assez nombreux travaux ont été consacrés à la longueur moyenne des racines existant dans un cm^3 de sol. Les systèmes racinaires sont très imbriqués, et chaque pied explore 0,2 à 0,3 m^2 dans la zone 0-30 cm. On peut admettre que les racines sont réparties au hasard dans cette zone, dans l'interligne comme sur la ligne, au moins quand le sol est assez humide. PINTHUS et ESHEL (1962), PINTHUS (1967) ont étudié en conditions artificielles la vitesse de colonisation. BARLEY (1970), TROUGHTON (1962), WILLIAMS (1960) fournissent des éléments permettant d'évaluer cette occupation *par plante* :

BARLEY :	0-15 cm	5-25 m	TROUGHTON :	0-20 cm	5-25 m
	20-50 cm	4 m		20-40 cm	1-10 m
	75-100 cm	2 m		40-60 cm	0,1-2 m
				plus de 60 cm	0,1-1 m

Il s'agit essentiellement des racines principales. Au Canada, PAVLYCHENKO (1942) a trouvé 360 m de racines principales par m^2 dans les dix premiers cm de sol sous blé d'hiver et 53 000 m de racines de 2e et 3e ordre, soit 1 400 kg ha^{-1} ; l'ensemble représentait 50 cm cm^{-3} dans cette couche.

Nous sommes parvenus nous-mêmes à 32 cm cm^{-3} sous *Champlein* (Blé d'hiver) dans l'horizon 0-10 cm (en perdant certainement des racines de 3e ordre), 8 cm cm^{-3} de 10 à 20, 6 cm cm^{-3} de 20 à 30, et 2 cm cm^{-3} de 30 à 40, soit 320 m par pied. Le poids sec par unité de longueur moyenne de racine est de 2,6 10^{-6} kg m^{-1} environ.

On a figuré la répartition spatiale des racines à la floraison figure 4.

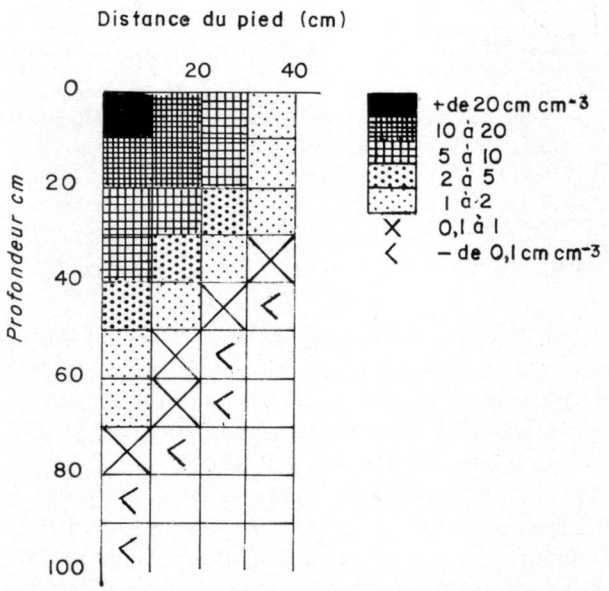


FIG. 4. — *Longueur de racines des divers ordres chez le Blé, par unité de volume de sol* (cm cm^{-3}) *et par pied, dans une population comportant* 100 *à* 300 *plantes par* m^2

b) *Évolution comparée des blés d'hiver et de printemps.*

L'enracinement des blés d'hiver s'effectue avant les froids. Il est constitué des racines séminales, des premières racines nodales et de quelques racines latérales. L'enracinement peut atteindre 75 cm de profondeur au début de l'endurcissement, et 100 à 125 cm à la fin du tallage ; dans la mesure où la température du sol demeure supérieure à 0°C, on peut avoir une croissance hivernale des racines et le système séminal disparaîtrait au printemps (KMOCH *et al.*, 1957) ; mais ceci est contredit par BROUWER (1968), (avec des conditions climatiques et des génotypes différents, il est vrai). La figure 5 schématise l'évolution des différents organes.

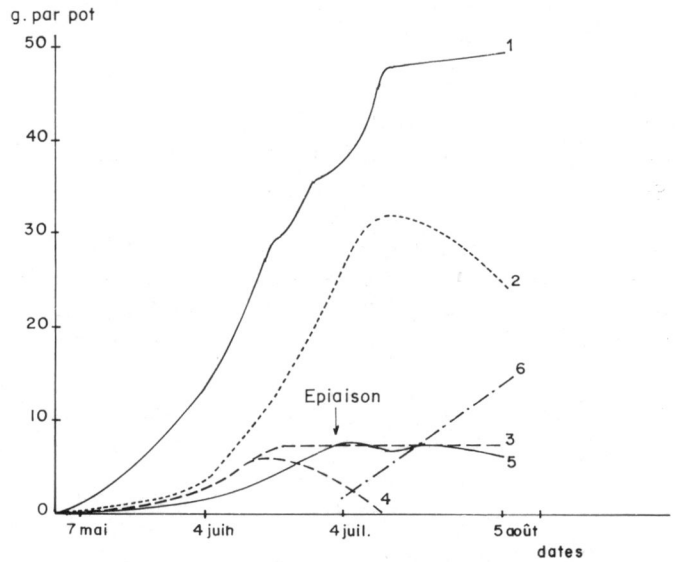


FIG. 5. — *Culture de Blé de printemps sur sable alimenté en solution nutritive*
Évolution des différents organes au cours de leur croissance (d'après STREBEYKO, 1963)

1. Matière sèche totale	49 g par pot à la récolte	
2. Tiges	30	—
3. Feuilles totales	(6 g pendant la végétation)	
4. Feuilles vertes	0 g par pot à la récolte	
5. Racines	6	—
6. Grains	13	—

ZADONTSEV *et al.* (1970) ont constaté un renouvellement des racines *actives* au cours du printemps. De nouvelles racines croissent en surface jusqu'à la floraison, si de l'eau redevient disponible à ce niveau. Mais le poids total de racines n'évolue plus, et décroît même généralement avant la floraison (PINTHUS, 1969 ; CERNY et BELKOVA, 1971 ; JONKER, cité par BROUWER, 1968) (fig. 6).

L'implantation du système racinaire dépend de la disponibilité en eau et des températures du sol en automne. KMOCH *et al.* (*loc. cit.*) ont montré comment des doses différentes données en préirrigation à l'automne agissent, concurremment à l'azote, au printemps : le poids de racines passe de 90 à 160 g m^{-2} avec azote, de 50 à 110 g m^{-2} sans azote. En juin, l'irrigation n'a plus d'action différentielle, mais le poids total de racines augmente de 230 à 390 g m^{-2} avec la fumure azotée.

L'enracinement des blés de printemps est semblable à celui des Blés d'hiver, mais il est moins abondant et moins profond le plus souvent. Remarquons que sur le plan physiologique, les Blés méditerranéens et tropicaux correspondent à des Blés alternatifs (ou de printemps), même s'ils sont semés à l'automne.

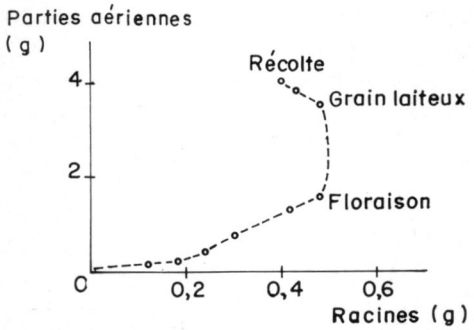


FIG. 6. — *Évolution du poids, en matière sèche, des racines de Blé au cours de leur végétation, en fonction de celui des parties aériennes, par plante entière*
(d'après BROUWER, 1968)

En raison des conditions climatiques (jours longs, températures croissantes, fort rayonnement global), leur évolution est rapide. La croissance des parties aériennes est proportionnellement plus importante que celle des parties souterraines. VARADE *et al.* (1970) ont montré comment températures, intensité lumineuse et oxygénation du sol agissent sur le développement de Blés de printemps de type mexicain.

c) *Répartition quantitative des racines.*

La croissance des racines, très rapide en début de végétation, a été étudiée particulièrement par WELBANK et WILLIAMS (1968), NEWBOULD *et al.* (1969), BALIK (1970) et ZADONTSEV *et al.* (1970). Dans un sol donné, la vitesse de croissance des racines séminales, et d'apparition des racines nodales, dépend d'abord du génotype (JANJATOVIC, 1968 ; NEWBOULD *et al.*, 1969), et des réserves présentes dans la graine (WILLIAMS, 1960). Les racines séminales sont très sensibles à l'état du milieu au moment de leur initiation (MILTHORPE, 1950 ; TROUGHTON, 1962) ; on a vu que chez les blés d'hiver, leur survie dépendait des conditions climatiques.

SINGH et DASTANE (1970) ont montré, en conditions tropicales, qu'on avait en moyenne :

5,2	racines séminales par pied à	15	jours, chacune ayant	18 à 22 cm
5,4	—	25	—	28 à 40 cm
6,1	—	40	—	49 à 64 cm

Par ailleurs, les racines coronaires atteignent 1 cm de long en moyenne à 40 jours. L'ensemble des racines atteint donc environ 1 m à 15 jours, 2 m à 25 jours et 3 m à 40 jours.

Les caractéristiques physico-chimiques du sol jouent un rôle dominant sur le développement des racines nodales (PERCIVAL, 1921).

MALET (1969, 1971) a étudié en Tunisie l'enracinement de Blés « mexicains » en sols lourds, mal drainés, et ayant tendance à s'alcaliniser. Les irrigations sont données

selon le schéma ci-dessous : (tabl. 2). A l'automne, l'eau d'irrigation avait une conductivité de 4 mmhos/cm, et de 1,64 à 3,65 mmhos/cm au printemps. Les rendements ont été de 36,2 q ha^{-1} pour T_1, et de 29,7 q ha^{-1} pour T_2. L'enracinement a été étudié en mai. Dix monolithes par type d'irrigation ont été prélevés jusqu'à 1 m. Le tableau 3 présente comparativement ces résultats et ceux de NEWBOULD *et al.* (1969), de SINGH et DASTANE (1970) et de BALDY (inédits). NEWBOULD *et al.* ont comparé des Blés « nains » et « européens ». Ils ont obtenus 57,7 q ha^{-1} de grain pour les européens, et 62,0 pour les nains, et leurs prélèvements n'ont pas dépassé 70 cm. Mais des racines existent au-delà, car ils ont montré, par ailleurs, que l'absorption de ^{32}P était la même entre 0 et 45 cm et entre 45 et 90 cm.

TABLEAU 2

Traitement	Apports d'eau en mm						
	Automne		Printemps			Pluies	Total
	Préirrigation	Levée	1	2	3		
T_1	—	57	55	32	—	298	442 mm
T_2	84	32	55	32	27	298	528 mm

Nous avons étudié l'enracinement de *Champlein* de 0 à 40 cm, en 4 monolithes de 25 × 25 × 10 cm avec 4 répétitions. Des sondages à la tarière au-delà ont montré que 10 p. 100 environ de racines se trouvent de 40 à 100 cm. Le rendement a été de 60 q ha^{-1} en grain.

On constate dans l'expérience de MALET que les rendements en grain et le poids de racines décroissent avec l'irrigation croissante ; ces valeurs sont environ moitié de celles trouvées à Versailles.

BALIK (1970) obtient 2 500 kg ha^{-1} de racines de Blé d'hiver et 25 q de grain sans engrais, 3 000 kg et 34 q de grain avec engrais (en sol podzolisé sableux). Il constate que 80 p. 100 des racines sont situés entre 0 et 20 cm sans engrais, et entre 0 et 50 cm avec engrais. Les racines n'ont pas dépassé 40 cm, sans engrais.

SINGH et DASTANE ont comparé des blés semi-nains et élevés dans les conditions du nord de l'Inde. Les poids de racines sont de 1 600 kg ha^{-1} pour *Sonora 64*, et 1 500 pour *Lerma Rojo*, et 75 p. 100 au moins des racines sont situées dans les 30 premiers cm de sol.

Ces résultats recoupent ceux de GOEDEWAGEN et SCHUURMAN (1950) qui citaient des valeurs de 2 600 kg de racines pour les Blés d'hiver et 1 500 pour les Blés de printemps.

La répartition horizontale des racines a été moins étudiée que la répartition verticale (sauf en solutions hydroponiques ou en bacs de sable). HURD (1968) a constaté que le blé *Marquis* peut explorer 30 cm de rayon. La compétition entre pieds, le génotype, et la nature du sol paraissent jouer les rôles principaux dans cette distribution. Ainsi, *Thatcher* ne dépasse pas 30 cm de rayon, alors que d'autres cultivars peuvent atteindre 60 cm dans un rhizotron.

TABLEAU 3

Répartition des enracinements dans le profil

1. SINGH et DASTANE (1970). *Blés semi-nains à la récolte* (116 jours).

Profondeur (cm)	Masse sèche en grammes par m²		
	Lerma rojo	*Sonora 64*	Pourcentage moyen
0-15	90,5	87,0	57,5
15-30	23,6	22,0	15,0
30-45	15,4	12,6	9,0
45-60	12,5	8,2	7,0
60-90	13,4	12,0	8,5
90-120	2,2	5,2	2,5
120-150	1,0	1,2	1,0
150-180	0,4	0	—
Total	160,0	148,2	

2. NEWBOULD *et al.* (1969) *donnent les comparaisons de blés européens et semi-nains en pourcentage* :

Profondeur	Européens	Semi-nains
0-2,5	0	0
2,5-10	41	34
10-30	35	35
30-50	12	21
50-70	12	10

3. MALET (1971) *a comparé deux traitements d'eaux d'irrigation en Tunisie sur Blé mexicain* Tobari 66.

Profondeurs (cm)	Traitements			
	Irrigation limitée		Irrigation forte	
	MS g m^{-2}	P. 100	MS g m^{-2}	P. 100
0-20	40,5	50,9	35,0	56,1
20-40	18,5	23,4	14,0	21,3
40-60	10,0	12,7	6,5	10,6
60-80	6,0	7,8	4,0	6,4
80-100	4,5	5,6	3,5	5,6

4. BALDY (résultats non publiés) *sur Blé d'hiver* Champlein *à Versailles. Prélèvement à l'épiaison* :

Profondeurs	MS g m^{-2}	P. 100
0-10	83	66
10-20	20	16
20-30	17	14
30-40	5	4

De façon générale, les racines interfèrent toujours entre elles dans un peuplement. LITAV et HARPER (1967) ont montré qu'en culture pure l'ensemble des racines d'un horizon se répartit sensiblement au hasard, ce qui recoupe l'observation de BARLEY et SEDGLEY (1961) selon laquelle les racines de *Lolium multiflorum* L. sont régulièrement réparties dans les 15 premiers cm du sol. PITTMAN (1964) a cependant constaté, sous Blé tendre, que la composante horizontale du chemin suivi par les racines séminales tend à s'orienter dans la direction du champ géomagnétique. Les racines latérales de rang élevé se répartissent néanmoins à peu près au hasard dans un sol fin, car elles s'infiltrent autour des granules de sol, et parviennent ainsi à occuper les hiatus laissés par les racines de premier ordre.

Dans des essais portant sur des plantes isolées, NYE et FOSTER (1961) ont constaté sur Maïs (à l'aide de ^{32}P) que l'absorption diminue rapidement avec la distance à la tige, pour s'annuler à 50 cm du pied, quel que soit l'âge de la plante.

B. — *Évolution de l'équilibre parties aériennes/racines (PA/R)*

On a vu que les conditions de milieu modifient fondamentalement la croissance des racines. Nous nous intéresserons ici à des essais faits en conditions naturelles.

Le rapport des parties aériennes aux racines évolue au cours de la vie de la plante, et permet de mettre en lumière la réaction de chaque génotype à un milieu donné, à chaque phase de son évolution. C'est ainsi qu'on observe des différences considérables entre les données de SINGH et DASTANE (*loc. cit.*), de BALIK (*loc. cit.*), et de JEVTIC (1968) en Yougoslavie, pour des blés approximativement au stade A (défini par JONARD *et al.*, 1952) (tabl. 4).

TABLEAU 4

Rapport parties aériennes/racines

SINGH et DASTANE	*Sonora 64*	PA/R : 1,5
SINGH et DASTANE	*Kalyan Sona* (nain)	— 1,1
BALIK	Blé d'hiver tardif	— 0,15
JEVTIC	*Bezostaya* (hiver, tardif)	— 1,1
JEVTIC	*San Pastore* (hiv., précoce)	— 1,6

Les données ne sont pas toujours faciles à comparer : certains auteurs rapportent le poids de racines au poids total de la plante, d'autres aux parties aériennes, d'autres enfin ne citent que le rendement en grain... Le tableau 5 présente quelques résultats caractéristiques.

Pendant la période végétative active (de la montaison à la floraison), les poids secs de *racines* et de *feuilles* évoluent parallèlement. La figure 5 dessinée d'après des données de STREYBEYKO (1963) illustre cette observation, signalée aussi par BROUWER (1968). Cette corrélation approximative est intéressante car il est plus aisé de mesurer les feuilles que les racines...

Le rapport *parties aériennes/racines* évolue au cours de la vie de la plante : à la fin du tallage, les poids des racines et des parties aériennes sont analogues. Au cours de la montaison, le rapport reste à peu près constant, ce qui signifie que les dévelop-

pements sont semblables. A la maturité, le rapport des Blés de printemps (10/1) est plus élevé que celui des Blés d'hiver (7/1 en moyenne). Les Blés d'hiver russes en particulier ont un enracinement considérable (jusqu'à 4 t ha^{-1}). Les Blés de zones tropicales ont des rapports peu élevés (6/1 à 9/1), une production de matière sèche totale faible, et un cycle végétatif court. Dans un milieu donné, le rapport paraît être d'autant plus élevé que le Blé est plus précoce.

TABLEAU 5

Évolution des rapports parties aériennes/racines (PA/ R)
au cours de la vie de divers cultivars de Blés dans différentes conditions écologiques

1. SINGH et DASTANE (1970) : *Blés en conditions tropicales.*

Cultivars	15 j	25 j	40 j	116 j (après la levée)
Sonora 64	1,2	1,6	1,7	8,4
Lerma Rojo	1,1	1,2	1,8	5,9
Kalyan Sona	1,2	1,1	1,4	5,4
Safed Lerma	1,3	1,3	1,6	9,2
Sonalika	1,3	1,1	1,3	5,8
NP 718	1,0	1,4	1,2	5,9

	Tallage	Montaison	Épiaison	Floraison	Grain pât.	Maturité
2. SCHUURMAN et KNOT (1970).						
Blé de printemps	3,3			5,7	10,0	11,0
3. SCHUURMAN et de BOER (1970).						
Avoine de printemps	4,3	5,0	6,0	8,3	8,2	10,0
4. BALDY (résultats non publiés) *Région parisienne.*						
Blé d'hiver *Champlein*			4,6		10,0	
5. STREBEYKO (1963) *Climat baltique.*						
Blé de printemps		6,5		3,6	6,5	7,0
6. WELBANK et WILLIAMS (1968).						
Orge de printemps	2,3	4,8		7,1	11,1	14,3
7. JEVTIC (1968) *Blés d'hiver en conditions continentales tempérées.*						
Bezostaya I	1,1	2,1	2,3	2,7	2,6	
Baika	1,2	2,1	3,1	3,7	3,8	
Crvena Zvezda	1,4	2,4	2,6	3,1	3,2	
Panonija	1,4	2,9	3,2	3,6	3,5	
San Pastore	1,6	3,4	3,6	4,3	4,3	
8. BALIK (1970) *Blé d'hiver dans la steppe russe en sol podzolique sableux.*						
Sans engrais (début tallage) ...	0,15	0,4	1,7	1,7		2,6
Avec engrais (— —) ...	0,18	0,4	1,6	1,9		3,0

Quel que soit le Blé, le rapport PA/R diminue constamment à partir de l'épiaison : la masse de racines tend à diminuer et les parties aériennes continuent à croître. Les conditions de prélèvement, souvent mal définies ou peu précises, interdisent d'attacher de l'importance à des variations d'un point en plus ou en moins.

TABLEAU 6

Action de l'ombrage sur la croissance des parties aériennes et des racines de Blé
(PENDLETON et WEIBEL, 1965)

Poids sec par pot en grammes	Ombrage (p. 100)	Pourcentage de chaque organe à la récolte			PA/R
		Racines	Pailles	Grains	
800	0	5	63	32	19
600	30	3	63	34	32
400	60	3	66	31	32
200	90	2	97	1	49

L'ombrage influe plus sur la croissance des racines que sur celle des parties aériennes (PENDLETON et WEIBEL, 1965) (tabl. 6). Il retarde l'apparition des racines adventives, et réduit leur développement, car la durée de la phase d'initiation florale n'est pas modifiée. CHLYAH et CHOUARD (1968), COÏC (1959), BROUWER (1965), VARADE *et al.* (1970) ont expliqué comment une réduction de l'éclairement (sans modification de la température de l'air) agissait sur l'alimentation en eau et en azote du Blé. Nous allons voir au chapitre suivant comment la solution du sol est utilisée par les racines pour le développement de la plante.

V. — ALIMENTATION DU BLÉ PAR SON SYSTÈME RACINAIRE

A. — *Absorption de l'eau par les racines*

Il y a plus d'un siècle que cette question est activement étudiée (DEMOLON, 1968). Ce paragraphe se réduira à des généralités, car des développements étendraient trop cette étude.

La notion d'évapotranspiration potentielle (ETP), due au géographe THORNTHWAITE (1948) explique la liaison existant entre la consommation d'eau d'un ensemble végétal et le climat. Précédemment, on rapportait cette consommation à l'unité de matière sèche produite, mais de nombreux facteurs agissent sur *l'efficacité* de l'eau. DE PARCEVAUX (1972) montre comment cette notion de consommation par unité de matière sèche produite peut être reprise et explicitée actuellement à partir des connaissances biologiques et biophysiques.

L'analyse physique de l'évapotranspiration a été faite par PENMAN (1956), puis par BOUCHET (1964). Dès 1961, TURC proposait une formule bien adaptée à l'échelle

régionale, basée sur des mesures climatiques simples. On a ainsi pu préciser les quantités d'eau *maximales* que des cultures *couvrantes* et en *phase de croissance* étaient susceptibles de consommer en fonction du climat local. Cette notion a été modulée depuis pour tenir compte des caractéristiques propres et du stade de croissance de la plante, de son *indice foliaire actif* notamment. On peut ainsi prévoir les besoins en eau réels d'une culture. Les travaux à ce sujet sont poursuivis actuellement par un très grand nombre de chercheurs.

Nous ne considérons ici qu'un aspect limité de la question : comment l'évapotranspiration optimale du blé peut-elle être assurée à chaque instant par son système radical, compte tenu des disponibilités en eau du sol ?

a) *De la germination au début du tallage*, le système racinaire s'accroît plus vite que les parties aériennes : le système séminal s'implante à 15 ou 20 cm de profondeur en quelques jours, dans un volume de sol plus ou moins conique ; puis le système nodal se développe. La transpiration des organes verts *par unité de surface de sol* est faible, et l'évaporation directe du sol souvent du même ordre : les feuilles n'ont qu'une surface très réduite (0,05 à 0,3 $m^2\ m^{-2}$ de sol).

b) Dans la mesure où l'alimentation en eau de l'horizon de surface (0 à 15 cm environ) est suffisante *pendant le tallage*, le système nodal se développera normalement : Boatwright et Ferguson (1967) ont montré en effet que les racines nodales croissaient mal dans un sol très sec en surface. Ce phénomène peut se rencontrer en zone semi-aride si une période sans pluie survient. Cette réduction du système racinaire se traduit par la suite par une croissance réduite de la plante entière.

c) Day et Intalap (1970) ont mis en évidence une période critique pendant *l'initiation des épis* : le Blé réagit en réduisant tous les éléments de la fertilité : nombres *d'ébauches* florales, de *grains* par épillet et de *talles* fertiles ; sa phase de montaison est raccourcie.

Hurd (1964, 1968), Ali-Zade et Sultanov (1970), ont mis en évidence le caractère génétique de la résistance des Blés à la sécheresse. Ils constatent en particulier de grandes variations des profondeurs d'enracinement pour un même déficit hydrique du sol. Kmoch *et al.* (1957) avaient déjà montré l'action de fortes pré-irrigations sur le développement printanier profond des racines de Blé (quand aucun problème annexe, salure ou autre, n'intervient). On sait que de grandes différences existent entre Graminées : ainsi Lemée (1967), Salim *et al.* (1965) donnent des exemples de graminées subdésertiques susceptibles de croître normalement dans des conditions ne permettant pas au Blé de survivre. On a vu aussi (Maertens, 1970) que la nature du sol jouait un grand rôle, une même variété réagissant différemment à des sols différents (Yang, 1971).

L'alimentation du Blé peut être limitée par l'eau disponible dans le profil, et par le volume de racines actives existant à un moment donné, mais aussi par un déséquilibre entre évapotranspiration et alimentation en eau de la plante. Molz (1971 *a*) propose un modèle mathématique permettant de décrire l'absorption de l'eau par l'ensemble des racines d'une plante qui transpire. Malgré certains défauts à court terme (Molz, 1971 *b*), le modèle répond bien à l'échelle de 3 à 7 jours ; il tient assez peu compte de l'irrégularité de l'enracinement par tranche de sol.

Les mesures entreprises par différents auteurs permettent de conclure que la *surface d'insertion* des racines sur les parties aériennes est au maximum de 40 mm^2

par plant de Blé, d'Orge ou d'Avoine bien développé. La moitié de cette surface, tout au plus, est susceptible de laisser passer l'eau.

Avec 200 plantes par m^2 et un enracinement allant à 1,50 m, on a vu que les 20 à 30 premiers centimètres de sol contiennent 80 p. 100 des racines. A la floraison, chaque plante explore environ 7,5 10^{-3} m^3 de sol (dont 1 à 1,5 10^{-3} m^3 intensivement), à l'aide de 200 à 300 m linéaires de racines représentant 0,6 à 1,0 m^2 de surface absorbante au total. 0,5 à 0,8 m^2 sont situés dans 1,5 10^{-3} m^3, et 0,1 à 0,2 m^2 dans 5 10^{-3} m^3 de sol.

Le Blé parvient à maintenir sa turgescence relative voisine de 100 p. 100 au lever du soleil pour des déficits hydriques supérieurs à — 15 bars, mais le flétrissement apparaît très rapidement et sa turgescence décroît fortement au cours de la journée (Fischer et Kohn, 1966). Dans ces conditions, la croissance est très ralentie. On observe des différences considérables entre cultivars (Ali-Zade et Sultanov, 1970 ; Belyakov, 1964 ; Fisher et Kohn, 1966 ; Fischer, 1970).

d) *A la floraison*, l'évapotranspiration réelle du Blé atteint 3 10^{-3} m par jour dans la région parisienne, 6 10^{-3} m en région méditerranéenne ou tropicale. La durée du jour varie de 12 à 16 h selon la région géographique considérée. Pour satisfaire les besoins, l'absorption des racines devra donc être de 10^{-5} à 10^{-6} m s^{-1} (en admettant que toutes les racines sont fonctionnelles, ce qui n'est pas certain) et l'eau passera au niveau des collets à une vitesse de 3 à 6 10^{-3} m s^{-1}. L'évapotranspiration atteint 1 mm par heure vers midi et les vitesses instantanées sont alors très élevées : 10^{-4} à 10^{-5} m s^{-1}, (au niveau des racines) et 8 à 16 10^{-3} m s^{-1} (au niveau du collet). On a montré (Bouchet *et al.*, 1964 ; Hallaire, 1964 ; Parcevaux, 1969) que ces vitesses instantanées pouvaient être limitantes, même dans la région parisienne.

L'activité de chaque *élément de racine* paraît décliner d'autant plus vite qu'il a été soumis à des conditions plus défavorables pendant son développement.

On constate *après la floraison* une réduction progressive de la capacité d'absorption du système racinaire. La sénescence des racines de Blé en fin de végétation n'a malheureusement pas été étudiée à notre connaissance, car la plupart des travaux portent sur des plantules (par exemple, Ferron *et al.*, 1967).

B. — *Absorption des éléments minéraux par les racines*

Thorup (1969) après Troughton (1957) mettent en évidence l'action du pH du sol dans l'absorption de l'eau par les racines. Au-delà du pH 9, on a flétrissement de la plante, même si le milieu est bien alimenté en eau. Ces pH se rencontrent souvent dans des sols salés.

On sait que le système racinaire du Blé explore le sol en profondeur ; mais l'essentiel des racines est généralement situé dans les 20 à 30 premiers centimètres. La disponibilité des éléments nutritifs ne sera donc pas la même en surface (0-20 cm) qu'en profondeur (80-100 cm). Dans le premier cas, on a couramment 20 à 30 cm de racines par cm^3 de sol et 0,1 à 1 cm cm^{-3} dans le second. Produits de solubilité, vitesses de diffusion dans le sol auront un rôle d'autant plus grand que la plante devra s'alimenter plus en profondeur.

Des mises au point récentes et complètes ont paru à ce sujet, par exemple Hénin *et al.* (1969), Maertens (1970), Mingeau (1969). Un volume spécial des *Annales agronomiques* a été consacré aux oligo-éléments (1970). Une *Thèse* portant

sur les caractéristiques des racines en relation avec l'absorption des ions et de l'eau a fait avancer nos connaissances (BATCHELDER, 1971).

La longueur moyenne de chaque racine passe de 1 à 7 d'un sol argileux à un sol sableux (MAERTENS, 1970). Les racines sont plus nombreuses et plus fines par kg de sol (quelle que soit l'alimentation), quand le blé pousse en sol sableux. Cette augmentation de la surface d'absorption est favorable dans la mesure où une réalimentation régulière peut être assurée (irrigations fertilisantes par exemple).

COÏC *et al.* (1963 *a* et *b*) arrivent à des résultats analogues, comme aussi BALIK (1970) : le blé passe de 1 000 kg ha^{-1} de racines avec 40 unités d'azote à 1 700 kg ha^{-1} avec 140 unités d'azote sur un sol sableux podzolisé. Mais les fortes doses d'azote augmentent le risque de verse (PRIKRYL, 1970), et on a développé des Blés seminains très résistants à cet accident (PAQUET, 1968 ; PAQUET *et al.*, 1970). Les apports fractionnés, recommandés depuis plus de vingt ans par COÏC, sont favorables en zone tropicale aussi, sur Blés nains (JAIN *et al.*, 1971) : les rendements d'un blé bien adapté (*S 227*) passent de 29 q de grain et 37 de paille à 48 et 59 q ha^{-1} respectivement pour 120 unités ha^{-1} N données en deux fois.

La localisation en surface de la fumure azotée peut réduire l'enracinement profond ; l'urée peut aussi inhiber temporairement la croissance des racines à son voisinage (TROUGHTON, 1962). SPRATT et GASSER (1970) ont mis en évidence l'action des formes ammoniacale et nitrique d'azote sur la croissance et l'efficience de l'eau chez le Blé.

Si la distance moyenne de parcours d'un ion minéral de sa source à la racine augmente, on peut aboutir à une insuffisance de l'alimentation instantanée. Ceci peut être dû à l'alimentation en eau, ou au faible développement des racines à un niveau donné. BARLEY (1970) et OMANWAR et ROBERTSON (1970), après NYE (1966), ont montré que l'alimentation nitrique se fait essentiellement par diffusion dans la solution du sol.

ADAMS et NEWMAN (1970) ont prouvé que l'alimentation azotée du Blé demeurait normale avec moins d'un centimètre de racine par cm^3 de sol, alors que l'alimentation phosphatée réclamait au moins 8 cm cm^{-3} pour s'effectuer normalement, car la vitesse de diffusion de l'ion phosphorique est beaucoup plus faible que celle de l'azote. Le rayon d'influence des racines ne dépasse pas 10^{-3} m pour le phosphore, alors qu'il est supérieur à 10^{-2} m pour l'azote. En conditions naturelles, on peut avoir un déficit alimentaire en phosphore quand les horizons superficiels sont pauvres en cet élément.

FAWCETT et QUIRK (1962) avaient déjà mis en évidence un gradient décroissant de concentration des ions phosphoriques des capillaires les plus fins, vers les ménisques des interstices les plus grands. Des changements rapides de régime hydrique du sol, renouvelant la « réserve facilement utilisable » (HALLAIRE et BALDY, 1964) peuvent aboutir à des carences temporaires en phosphore.

Cependant des apports massifs de phosphore et d'azote sont inefficaces vis-à-vis du rendement en grain, et provoquent notamment un développement exagéré des racines adventives (BLACK, 1970).

L'essentiel des éléments majeurs est absorbé pendant la montaison ainsi que l'a montré CURIC (1969) ; entre le 20 avril et le 10 mai, le Blé absorbe 40 à 60 p. 100 du total des éléments minéraux accumulés au stade « Grain laiteux ». Le pourcentage varie en fonction des cultivars et des ions.

L'étude de l'action de concentrations croissantes des divers ions est fondamentale, et HOMÈS et VAN SCHOOR (1969) ont développé la méthodologie des essais, SARIC et PETROVIC (1969) ont étudié l'action de doses croissantes d'engrais en début de végétation, et CURIC (*loc. cit.*) a suivi leurs effets jusqu'au stade « Grain laiteux ». Ils ont trouvé de grandes différences variétales chez les Blés d'hiver ; l'absorption n'a pas lieu à la même date en conditions homogènes, sans qu'on puisse trouver de liaison étroite avec les caractères de précocité ou de rendement des variétés. CURIC (*loc. cit.*), et BALIK (1970) ont dosé les macroéléments plusieurs fois au cours de la croissance, tant dans les racines que dans les parties aériennes. CURIC constate des écarts importants entre cultivars : 36 à 44 mg (par plante) d'azote, 6 à 8 de phosphore, 29 à 41 de potassium, avec des équilibres différents entre cultivars

Cultivar	Azote (mg/plante)	Potassium (mg/plante)
Autonomia	35,6	40,6
Étoile de Choisy	40,3	33,9
Mara	43,7	29,1

La distribution du phosphore dans les différents organes dépend du cultivar et de la phase d'activité de ceux-ci (KUPKA, 1971). Les racines s'appauvrissent pendant la maturation, et perdent 25 p. 100 de leur poids et une grande partie des « cendres » qui migrent dans le reste de la plante, le poids total de cendres variant peu de la floraison à la maturation (BALIK, 1970).

MENGEL et FORSTER (1971) ont effectué une série d'expériences destinées à étudier l'action de carences temporaires ou permanentes sur la productivité du Blé. Les premières, d'une durée de 15 jours environ, n'ont pas eu d'effet significatif. Les secondes, par contre, ont annulé complètement (potassium), ou presque (azote, phosphore), le rendement en grain. HARPER et PAULSEN (1967, 1969) ont analysé systématiquement l'action de dix macro- et micro-éléments sur l'assimilation de l'azote et la synthèse des protéines pendant les premières phases de croissance du Blé. Toute carence réduit l'activité spécifique de la nitrate-réductase. Le cuivre (HARPER, 1968) est le seul élément commandant la synthèse des protéines, alors que le fer et le soufre n'auraient pas d'action sur la teneur en nitrates des céréales. Chaque cultivar a cependant une réaction propre (PRIKRYL, 1971). COÏC *et al.* (1963 *a*) avaient déjà souligné qu'un Blé carencé en phosphore avait des grains anormalement riches en soufre, et qu'une carence quelconque l'enrichissait en azote (COÏC *et al.*, 1963 *b*). JEANNIOT *et al.* (1970) ont montré l'action du potassium sur la synthèse des protéines, et THIEN (1971) l'effet synergétique d'un prétraitement des graines dans une solution azotée sur l'absorption du phosphore par la plantule. Cet auteur pense qu'il s'agit d'une action de nature différente de celle favorisant les migrations dans la plante. Il semble bien (HACKETT, 1968) que ces effets synergétiques soient communs à tous les éléments fertilisants aux doses optimales.

L'étude de la physiologie des racines a fait de grands progrès depuis quelques années. NYE (1966) a mis au point une technique permettant d'étudier l'absorption sur des fragments de racines, et SCOTT-RUSSEL et SANDERSON (1967) sur des racines entières. MAERTENS (1970), qui a fait progresser ces études, a montré que l'utilisation de fragments de racines pouvait aboutir à des artefacts. Un gradient de concentration

suffisant doit exister entre la solution du sol et la racine, car dans un milieu isotonique, l'exsorption (étudiée au ^{32}P) est importante (ROVIRA et BOWEN, 1970).

L'absorption du potassium en fonction du temps a un caractère non monotone (GRIGNON et SALSAC, 1969), et la concentration du phosphore dans la solution a un effet important sur son absorption : aux faibles concentrations (< 1 mM/l), on constate que l'absorption suit deux isothermes hyperboliques, et aux fortes (> 1 mM/l) une isotherme linéaire d'absorption passive (SCOTT-RUSSELL et SANDERSON, *loc. cit.*). Une des isothermes peut correspondre à l'activité des microorganismes de la rhizosphère mise en évidence par TARDIEUX-ROCHE et TARDIEUX (1970). Le transport à travers la plante paraît suivre les mêmes lois (EDWARDS, 1970).

CHAPMAN et KEAY (1971) ont montré qu'une alimentation phosphorique suffisante était particulièrement défavorable juste avant le début de la montaison. A photopériode et température égales, elle influe sur le nombre moyen de feuilles formé sur un cultivar donné : cet effet se répercute d'autant plus sur le rendement que le Blé est plus précoce et moins sensible à la photopériode (SMITH, 1969). Si l'absorption des ions dépend étroitement de la température, le cultivar joue un rôle aussi : les Blés d'hiver les plus résistants au froid ont un optimum d'absorption de ^{32}P vers 4 à 6°, alors que les Blés de printemps en absorbent d'autant plus que la température s'élève (au moins jusqu'à 18-20°) (STARZYCKI *et al.*, 1964 ; STOJKOVIC *et al.*, 1968 ; SARIC et PETROVIC, 1969).

Citons encore les travaux de TANAKA (1971) qui a mis en évidence le rôle du calcium dans la croissance des racines et la formation des poils absorbants (sur Avoine et Riz). ABUTALYBOV *et al.* (1964) ont montré l'action synergétique de ce cation sur l'absorption des halogènes.

On a beaucoup étudié l'absorption et l'exsudation des substances par les racines (STREET, 1966) ; les sites et les mécanismes physiologiques commandant l'absorption (RUSSEL et NEWBOULD, 1968 ; BOWEN et ROVIRA, 1966) et l'exsudation (MCDOUGALL et ROVIRA, 1970 ; ROVIRA et BOWEN, 1970) des ions et des composés organiques commencent à être connus. Le rôle des microorganismes de la rhizosphère sur ces phénomènes a été mis en évidence (RIVIÈRE, 1960, 1963 ; TROUGHTON, 1962) et aussi l'action de l'éclairement des parties aériennes sur l'activité de ces microorganismes (JACQ et DOMMERGUES, 1970).

CONCLUSIONS

La croissance des racines de Blé dans le sol est continue, mais son rythme est variable. Après une phase caractérisée par un rapport racines sur parties aériennes constant et voisin de 1, les parties aériennes croissent plus vite que les racines pendant la montaison, et on atteint un nouveau palier peu avant l'épiaison. Jusqu'à la fin de la floraison, de nouvelles racines secondaires peuvent encore se développer, et même des racines nodales ébauchées avant le stade B de JONARD *et al.* (1952).

Les premiers centimètres avant l'apex sont les plus actifs et leur vitesse d'absorption décroît en quelques jours pour atteindre un palier (passant de 10 à 1 par unité de longueur). L'activité des racines « adultes » est assez stable pendant plusieurs

mois, mais des racines âgées disparaissent : c'est le plus souvent le cas des racines séminales des blés d'hiver. A partir de l'épiaison, on ne constate plus que le remplacement de racines disparues, et peu après la floraison, leur masse totale commence à décroître.

C'est pourquoi les mesures *pondérales* de racines par horizon donnent une idée assez approximative de leur activité : au voisinage de la surface, on a une quantité considérable de racines dont une fraction croissante vieillit, alors qu'en profondeur et en périphérie, on a moins de racines, généralement plus jeunes, pas forcément très efficaces.

L'action du climat se caractérise notamment par l'effet très variable des températures en fonction du génotype, de la phase de végétation, de l'histoire climatique de la plante, et des disponibilités en eau du sol. Rayonnement solaire et photopériode ont des effets essentiellement indirects. L'environnement des racines (structure et texture, densité apparente et atmosphère du sol) joue un rôle décisif dans leur développement.

L'enracinement peut varier beaucoup en *poids* et en *répartition*, selon qu'on a un sol podzolisé peu fertile, un sol argileux ou salé, ou un limon fertile : dans un podzol sableux, plus de 90 p. 100 des racines se trouvent entre 0 et 50 cm, alors que dans un lœss riche et bien aéré, elles se répartissent sur plus de deux mètres ; la surface absorbante totale variera de façon analogue. Alimentation minérale et environnement microbien des racines peuvent agir aussi.

On peut considérer que, pour l'essentiel, on connaît les principales réactions des grands groupes de précocité des Blés durs et tendres à des conditions déterminées. De grands progrès sont cependant encore à accomplir en ce qui concerne les relations existant entre la dynamique et la croissance des racines, l'absorption différentielle des ions et les caractéristiques morphologiques et qualitatives des Blés. Certains travaux de génétique fondamentale, devraient permettre d'aboutir rapidement à une amélioration de ces caractéristiques.

L'amélioration de l'enracinement du Blé est loin d'avoir progressé au même rythme que celle des caractéristiques des parties aériennes. On peut penser, par exemple, que l'obtention de Blés semi-nains à cycle court, phase de maturation rapide et fort enracinement, présenterait un intérêt certain en conditions climatiques défavorables.

On abordera dans des articles ultérieurs l'étude de la photosynthèse chez le Blé (BALDY, 1973 *a*), et les relations mutuelles existant entre plantes dans des peuplements de Blés (BALDY, 1973 *b*). L'ensemble de ces études, à la fois bibliographiques et basées sur des travaux personnels, a pour but de préciser l'état des connaissances sur l'Écologie du Blé.

Reçu pour publication en juin 1972.

SUMMARY

LATEST RESEARCH DEVELOPMENTS INTO THE ROOT SYSTEM OF WHEAT (*TRITICUM* SP.)

After reviewing the methods applied to examination of root systems, this *bibliographical analysis* goes into the morphogenesis of the root system, *i. e.*, genotypical and phenotypical effects and action of growth-regulating substances.

Next, the influence of environmental conditions on root growth is fully gone into, that is, physico-chemical conditions of the soil and effects of the atmospheric pattern on the underground organs. The value of soil aeration and of instant water availability for root growth, as well as the effects ot the temprature of air and soil, and also solar radiation, are set forth.

Root development during the growth cycle of Wheat is studied, more particularly root density in each horizon, function of the root, changing ratio of the root to the top of the plant in connection with the relevant variational genetic and ecological causes. Finally, nutrition of the root system is approached.

Suggestions are made in conclusion to give a bias to research for improving yields and efficiency of the root system of Wheat.

ZUSAMMENFASSUNG

DAS NEUESTE IM STUDIUM DES WURZELSYSTEM VON WEIZEN (*TRITICUM* SP.)

Nachdem die verschiedenen Untersuchungstechniken der Bewurzelung berücksichtigt wurden, befasst sich diese *bibliographische Analyse* mit der Morphogenesis des Wurzelsystems : genotypische und phänotypische Wirkungen und Tätigkeit der Wachstumreglers.

Der Einfluss der Umweltsbedingungen auf das Wachstum der Wurzeln wird danach analysiert : physikochemischer Zustand und Klima *des Bodens* ; Einfluss des *Luftklimas* auf die unterirdischen Organe. Die Wichtigkeit der Bodendurchlüftung und der sofortigen Wasserversorgung auf die Entwicklung der Wurzeln wird unterstrichen sowie die Wirkung der Luft - und Bodentemperatur und der Sonnenausstrahlung.

Die Evolution der Wurzel im Laufe des vegetation Zyklus des Weizens wird danach erörtert. Insbesondere wird die Anbaudichte jedes Horizonts untersucht, der Begriff der funktionellen Wurzel, die Evolution des Verhältnisses *Wurzel/Luftausgesetzten Bestandteilen*, wobei die genetischen und ökologischen Ursachen der Veränderungen besonders berücksichtigt wurden. Die Versorgung des Wurzelsystems wird schliesslich erörtert und als Schlussfolgerung werden Untersuchungshinweise aufgeführt, damit die Produktivität und die Wirksamkeit des Wurzelsystems des Weizens verbessert wird.

РЕЗЮМЕ

Новое в изучении корневой системы пшеницы.

К. БАЛЬДИ.

Во вступительной части данной работы, представляющей *библиографический анализ*, рассматриваются технические методы, применяющиеся при изучении окоренения и изучается морфообразование корешковой системы : генотипические и фенотипические эффекты и действие регуляторов роста.

Затем анализируется влияние условий *среды* на рост корней : физико-химическое состояние и климат *почвы*, и влияние климатических условий *воздуха* на подземные органы растения. Подчеркивается важность аерации и немедленной наличности влаги для развития корней, так-же как и действия температур воздуха и почвы, и солнечного излучения.

Следует-изучение эволюции корней в течении вегетативного цикла пшеницы, и, в частности, плотности оккупации каждого горизонта, понятия «функциональный корень» и эволюции соотношения *корни/надземная часть*, с оглядкой на генетические и экономические причины изменений. И, в заключение, рассматривается питание корешковой системы и предлагаются направления для исследований, способные увеличить продуктивность и эффективность корешковой системы пшеницы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABUTALYBOV M. G. *et al.*, 1964. Influence du calcium sur l'absorption des haloïdes par le système radiculaire du Blé et leurs interactions (en russe). *Isv. Akad. Nauk Azerb. S. S. R.*, Ser. Biol. Nauk, (4), 13-18.

ABUTALYBOV M. G., MARDANOV A. A., 1967. Explication du mécanisme permettant aux éléments nutritifs minéraux de pénétrer dans les racines (en russe). *Isv. Akad. Nauk Azerb. S. S. R.*, Ser. Biol. Nauk, (3/4), 33-48.

ALI-ZADE M. A., SULTANOV Ja. G., 1970. Les changements de concentration du suc cellulaire et de la capacité de rétention de l'eau par les feuilles de quelques variétés de blés et d'orge, en relation avec leur résistance à la sécheresse (en russe). *Isv. Akad. Nauk Azerb. S. S. R.*, Ser. Biol. Nauk, (5/6), 41-44.

ANDREWS R. E., NEWMAN E. I., 1970. Root density and Competition for nutrients. *Œcol. Plant.*, **5** (4), 319-334.

ASANA R. D., WILLIAMS R. F., 1965. The effect of temperature stress on grain development in Wheat. *Austr. J. agric. Res.*, **16** (1), 1-13.

ASPINALL D., 1961. The control of tillering in the Barley plant (I). *Austr. J. biol. Sci.*, **14** (4), 493-505.

AUBERT G., OLLAT, 1969. Observations sur l'utilisation d'eaux saumâtres pour l'irrigation et sur l'amélioration des sols salés. *C. R. Acad. Agric. France*, **55** (4), 244-250.

AVUNDZHJAN E. S., SHIRAKJAN E. Kh, 1970. Influence du chlorure de chlorocholine sur la répartition des acides aminés dans les racines et la partie aérienne des plantes (en russe). *Dokl. Akad. Nauk. Arm. S. S. R.*, **50** (4), 247-251.

AZZI G., 1927. *Le climat du Blé dans le monde.* Institut International d'Agriculture, Rome, 1161 p.

BABENKO V. I., INKINA A. G., 1970. Effect of temperature and daylength on organogenesis and content of carbohydrate-nitrogenous substances in some cereals. *Soviet Plant Physiol.*, **17** (3), 423-430.

BALDY Ch., 1973 *a*. Sur l'énergie active en photosynthèse. Son utilisation par des graminées au cours de leur développement. Cas particulier de peuplements de Blé. *Ann. agron.* **23** (6), 685-699 ; **24** ; 1-31.

BALDY Ch., 1973 *b*. *Croissance, photosynthèse et répartition de la lumière dans des peuplements de Blé tendre. Contribution à l'étude des relations mutuelles dans des peuplements purs et des associations ligne à ligne de cultivars.* Thèse de Dr-Ingénieur. Université de Paris-Sud. Sous presse.

BALIK G. S., 1970. Effect of fertilizers on the growth of roots and overground organs of winter Wheats (en russe). *Agrokhimija*, **6**, 51-54.

BARLEY K. P., 1962. The effect of mechanical stress on the growth of Roots. *J. expt. Bot.*, **13**, 95-110.

BARLEY K. P., 1970. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. *Adv. Agron.*, **22**, 159-201.

BATCHELDER A. R., 1971. *Roots characteristics in relation to ion and water uptake.* Cornell University Ph. D. Thesis, 141 pp. (University Microfilm, *Diss. Abstr. Intern.*, Ser. B. **31**, N° 7, 5 609).

BELYAKOV J. J., 1964. Résistance à la sécheresse du sol lors de différents stades du développement du Blé et de l'Orge) (en russe). *Sb. Trud. Aspir. Molod. Nauk. Sotrud.*, **5**, (9) 193-196.

BLACK A. L., 1970. Soil water and soil temperature influences on dryland winter Wheat. *Agron. J.*, **62** (6), 797-801.

BLACK A. L., 1970. Adventitious roots, tillers and grain yield of spring Wheat as influenced by N, P fertilization. *Agron. J.*, **62** (1), 32-36.

BOATWRIGHT G. O., 1971. Effect of surface soil temperature on early growth nutrient uptake and nutrient translocation by spring Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Diss. Abstr. internation.*, Ser. B, (**1** (9), 5108 (résumé de thèse).

BOATWRIGHT G. O., FERGUSON H., 1967. Influence of primary and/or adventitious root systems on Wheat production and nutrient uptake. *Agron. J.*, **59**, 299-302.

BOUCHET R. J., 1964. Evapotranspiration réelle. Évapotranspiration potentielle et production agricole. in : *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A. éd., 151-233.

BOUCHET R. J., *et al.*, 1964. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évaporation potentielle, in : *L'eau et la la production végétale*, I. N. R. A. éd. 233-242.

BOWEN G. L., ROVIRA A. D., 1966. Microbial factors in short term phosphate uptake studies with plant roots. *Nature* (London) **211**, 665-666.

BROUWER R., 1965-1966. Root growth of grasses and cereals in : « The growth of cereals and grasses ». *Proc. 12th Easter School agric. Sci. Univ. Nottingham*, 153-166.

BROUWER R., 1968. Beziehung zwischen Spross- und Würzelwachstum. *Angew. Bot.*, **41** (6), 244-254.

CAMPBELL C. A., FERGUSON W. S., 1969. Influence of air temperature, light intensity, soil moisture stress and soil aeration on moisture use by wheat. *Canad. J. Plant Sci.*, **49** (2), 129-137.

CARLES J., SOUBIÈS L., GADET R., 1960. Étude physiologique de la verse du Blé. *Ann. Physiol. végét.*, **2** (3), 143-170.

CENOV A., 1965. Overwintering of *Bezostaya* I wheat variety as affected by winter drought (en bulgare). *Rasreniev. Nauki*, **2** (9), 2-11.

CERNY V., BELZOVA E., 1971. Dynamics of the changes in the amounts of root matter in three winter wheat varieties with different rates of fertilization (en tchèque). *Rostl. Vyr.*, **17** (8), 819-826.

CHAPMAN M. A., KEAY J., 1971. The effect of age on the response of wheat to nutrient stress. *Austr. J. exper. Agric. anim. Husband.*, **11** (49), 223-228.

CHLYAH H., CHOUARD, P., 1968. Influence du niveau d'éclairement sur le développement corrélatif des racines adventives, du tallage et de l'induction florale chez le Blé dur (cultivar *Bidi 17*). *C. R. Acad. Sci.*, **266** D (12), 1275-1278.

CHUJO H., 1966. I. Difference in vernalization effect in wheat under various temperatures. II.-The effect of diurnal variation of temperature on vernalization in wheat. *Proc. Crop Sci. Soc. Japan*, **35**, 177-186 et 187-194.

COÏC Y., 1959. Sur l'utilisation de l'azote par le Blé lorsque l'eau ou la lumière sont en quantité insuffisantes. Relations avec l'utilisation de l'eau. *Ann. Physiol. végét.*, **1** (4), 265-272.

COÏC Y. *et al.*, 1963 *a*. Influence de la déficience en Phosphore sur la composition minérale de l'Orge à la récolte. *Ann. Physiol. vég.*, **5** (4), 277-280.

COÏC Y. *et al.*, 1963 *b*. Influence de l'alimentation minérale sur la composition des protéines des graines de céréales (Blé et Orge). *Ann. Physiol. vég.*, **5** (4), 281-292.

CURIC R., 1969. Dynamics of nutrient element accumulation in different Wheat varieties. *Contemp. Agric.*, **17** (11-12), 217-227.

DARRA B. L., *et al.*, 1970. Effect of growth regulators and salts on the germination of Wheat (*Triticum aestivum* L.) under high salinity, sodium adsorption ratio and Boron levels. *Indian J. agric. Sci.*, **40** (5), 438-444.

DAY A. D., INTALAP S., 1970. Some effects of soil moisture stress on the growth of Wheat. *Agron. J.*, **62** (1), 27-29.

DELETANG J., Mise au point d'une technique de prélèvement et d'observation de profils racinaires en place. *Seita, Ann. Dir. Ét. Équip.*, Sect. 2., (6), 93-99.

DEMOLON A., 1968. *Croissance des Végétaux cultivés*. Dunod Ed. Paris, 590 pp.

DIEHL R., 1952. Quelques aspects de la résistance au froid chez les céréales d'hiver. *Ann. Amélior. Plantes*, **2** 257-303.

DOUSSINAULT G., 1970. Problèmes posés par l'amélioration de la résistance du Blé tendre vis-à-vis du piétin-verse *Cercosporella herpotrichoides* FRON. *Ann. Amélior. Pl.*, **20** (4), 433-452.

DREZGIG P. *et al.*, The effect of temperature and sowing depth on root growth and dry matter production of seedlings of some winter Wheat varieties. *Contemp. Agric.*, **17** (11-12), 443-453.

EDWARDS D. G., 1970. Phosphate absorption and long-distance transport in Wheat seedlings. *Austral. J. biol. Sci.*, **23** (2), 255-264.

ELLERN S. J., 1968. A re-usable experimental containers for roots studies. *Israel J. agric. Res.*, **18** (3), 135-136.

FAGGIOLI M. Instituto nacional de Tecnicas Agropecuarias, Argentine. Comm. pers.

FAWCETT R. G., QUIRK J. P., 1962. The effect of soil-water stress on the absorption of soil phosphorus by Wheat plants. *Austr. J. agric. Res.*, **13** (2), 193-205.

FERRON F., VAN ASSCHE J., COSTES C., 1967. Recherches sur les transformations de l'eau dans les feuilles avec l'eau tritiée. III.-Circulation et échange de l'eau dans les jeunes plantes de deux variétés de Blé tendre, *Florence-Aurore* et *Guelma*. *Ann. Physiol. vég.*, **9** (3), 245-271.

FISCHER R. A., 1970. The effect of water stress at various stages of development on yield processes in Wheat. Coll. Unesco *Rép. Pl. fact. climat*, Uppsala, 25 pp.

FISCHER R. A., KOHN G. D., 1966. I. - The relationship between evapotranspiration and growth in the Wheat crop. II. - Soil-water relations and relative turgidity of leaves in the Wheat crop. *Austr. J. Agric., Res.* **17** (3), 255-280.

FISCUS E. L., 1970. *Internal root aeration*. Thesis. Diss. Abstr. internation., **31**, B (5) : 2935.

EL-FOULY M. M. *et al.*, Stimulatory effects of N-dimethyl-N-(betachloroethyl-hydrazonium chloride on growth and yield of Wheat. *Agrochimica*, **14** (4), 327-331.

FRIEDBERG I., 1933. Analyse bibliographique du « Bulletin de la Jarovisation ». *Ann. agron.*, 275-280.

FRIEND D. J. C. *et al.*, 1967. Effect of daylength on the growth of Wheat. *Canad. J. bot.*, **45**, 117-131.

FRIEND D. J. C., PURVIS O. N., 1963. Studies in vernalization of cereals. XIV.-The thermal reactions in vernalization. *Ann. bot.* N. S., **27**, 553-579.

GAIDAMAKINA A. F., 1969. Division and extension rate of seedling rootlet cells under salinization conditions. *Soviet plant physiol.*, **16** (2), 277-280.

GERARD C. J., 1971. Influence of osmotic potential, temperature and calcium on growth of plant roots. *Agron. J.*, **63** (4) : 555-558.

GESLIN H., 1944. *Étude des lois de croissance d'une plante en fonction des facteurs du climat. Contribution à l'étude du climat du Blé*. Thèse I. N. R. A., Imprimerie Nat. éd., 116 pp.

GESLIN H., JONARD J., 1948. Maturation du blé et climat. « Le pain ». *Les Journées scientifiques*. C. N. R. S. éd., 111-121.

GOEDEWAAGEN M. A. J., SCHUURMAN J. J., 1950. Les racines des plantes cultivées, et des prairies, source de matière organique dans le sol. *C. R. IVe Congrès Internat. Sci. Sol.*, Amsterdam, vol. II, 28-31.

GORDON L. Kh., BICHYRINA A. A., 1970. Effect of increasing water deficit on respiratory metabolism in plants. *Dokl. bot. Sci.*, 190/192, 36-38.

GREENWOOD D. J., 1968. Effect of oxygen distribution in the soil in plant growth in : *Root growth. Proc. 15th Easter School agric. Sci.*, Nottingham, 202-223.

GREENWOOD D. J., 1971. Studies on the distribution of oxygen around the roots af mustard seedlings (*Sinapis alba* L.). *New Phytol.*, **70** (1), 97-101.

GRIGNAC P. *Contribution à l'étude de* Triticum durum DESF. Thèse, I. N. R. A. éd., 152 pp.

GRIGNON G., SALSAC L., 1969. Sur le caractère non monotone des courbes d'absorption du potassium, en fonction du temps, dans les racines et les cellules isolées. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **268** D, (1), 73-75.

HACKETT C., 1968. A study of the root system of Barley. I.-Effect of nutrition of two varieties. *New Phytol.*, **67** (2), 287-299.

HACKETT C., 1968. Quantitative aspects of the growth of cereal roots systems. in *Root growth. Proc. 15th Easter School agric. Sci.*, Nottingham. 134-147.

HACKETT C., STEWART H. E., 1968. A comparison of the root systems of three exotic varieties of Barley with the root system of the variety *Proctor*. *Agric. Res. Counc. Letcombe lab., Ann. Rep.*, 20-22.

HALLAIRE M., 1964. Le potentiel efficace de l'eau dans le sol en régime de dessèchement. in *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A., éd. 27-62.

HALLAIRE M., BALDY Ch., 1964. Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de l'eau. in *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A. éd., 15-25.

HANUS H., 1970. The influence of different CCC concentrations on root development of some Wheat varieties (en allemand). *Z. Acker u. Pflanzenbau*, **132** (1), 59-72.

HARPER J. E., 1968. *Nitrogen assimilation and protein synthesis in Wheat seedlings as affected by mineral nutrition.* Thesis Kansas State Univ., 88 pp.

HARPER J. E., PAULSEN G. M., 1967. Changes in reduction and assimilation of nitrogen during the growth cycle of winter wheat. *Crop Sci.*, **7** (3), 205-209.

HARPER J. E., PAULSEN G. M., 1969. Nitrogen assimilation and protein synthesis in wheat seedlings as affected by mineral nutrition. I.-Macronutrients. *Plant Physiol.*, **44** (1), 69-74.

HEAD G. C., Méthodes pour l'étude de la production des systèmes radiculaires. in *Méthodes d'études de l'écologie du sol*, Coll. Unesco, 151-157.

HÉNIN S. *et al.*, 1969. *Le profil cultural.* Masson et Cie éd., 332 pp., Paris.

HOMÈS M. V., VAN SCHOOR G. H., 1969. *La nutrition minérale des végétaux.* Masson et Cie éd., Paris, 162 pp.

HUMPHRIES E. C., 1968. CCC and Cereals. *Field crops abstracts*, **21**, 91-99.

HURD E. A., 1964. Root studies of three Wheat varieties and their resistance to drought and damage by soil cracking. *Canad. J. Plant Sci.*, **44**, 240-248.

HURD E. A., 1968. Growth of roots of seven varieties of spring Wheat at high and low moisture levels. *Agron. J.*, **60** (2), 201-205.

I. A. E. A. Colloques sur l'utilisation des radioisotopes en agriculture. *Isotopes in plant nutritution and physiology*, Vienna, 1967, 596 pp. — *Isotope and radiation in soil-plant nutrition studies*, Vienna, 1965, 699 pp.

I. N. R. A., Ed., 1970. Les oligo-éléments en France. *Ann. agron.*, **21**, 467-692.

IVANOV A., 1971. Effect of soil compactness on the growth and productive features of the Winter Wheat (en bulgare). *Rasteniev. Nauki*, **8** (4), 15-23.

JACK V., DOMMERGUES Y., 1970. Influence de l'intensité de l'éclairement et de l'âge de la plante sur la sulfato-réduction rhizosphérique. *Zbl. Bakteriol. Parasit. Infekt. Krankheit. Hyg.*, **125** (7), 661-669.

JAIN N. K. *et al.*, 1971. Effects of time and method of applying nitrogen to dwarf Wheats. *Exper. Agric.* **7** (1), 21-26.

JANJATOVIC V. *et al.*, 1968. Number and length of primary roots in different Wheat genotypes. *Contempor. Agric.*, **16** (7/8), 13-20.

JEANNIOT A. *et al.*, 1970. Influence du potassium sur le métabolisme protéique du Blé au cours de la germination et des premiers jours de la croissance. *Agrochimica*, **15** (1), 61-73.

JEVTIC S., 1968. The morpho-physiological properties of the root system of some high yielding Wheat varieties. *Contemp. Agric.*, **16** (7/8), 5-13.

JONARD J. *et al.*, 1952. Évolution de la tige et de l'épi chez la variété de Blé *V27* au cours de la période de reproduction. *Ann. Amelior. Pl.*, **2**, 31-54.

KARIM M. *et al.*, 1971. ^{86}Rb as tracer for Potassium : I. Uptake of Rb and K by Rice plant in nutrient solution. *Plant and soil*, **35** (1), 179-182.

KERRIDGE P. C. *et al.*, 1971. Separation of degrees of aluminium tolerance in Wheat. *Agron. J.*, **3** (4), 586-591.

KHALIL M. S. H., 1956. The interrelations between growth and development of Wheat as influenced by temperature, light and nitrogen. *Meded. Landb. Hogesch.* Wageningen, **56** (7), 73 pp.

KIZITSCHENKO E. G. *et al.*, 1970. Influence des températures élevées et du déficit d'eau sur la vitalité

du pollen et la productivité de certaines variétés de Blés d'hiver (en russe). *Dokl. Vses. Akad. Selskokh. Nauk im Lenina*, (7), 1-5.

KMOCH H. G. *et al.*, 1957. Root development of winter Wheat as influenced by soil moisture and nitrogen fertilization. *Agron. J.*, **49** (1), 20-25.

KOLDERUP F., 1970. Effect of temperature and daylength on seed setting in some varieties of common spring Wheat. *Meld. Norges Landbrukshogsk.*, **49** (32), 10pp.

KOROVIN A. I., ZHUCHILIN L. I., 1969. The development and productivity of spring Wheat after the cooling of soil at the zones of the tillering node and root tips. (en russe). *Selskokh Biol.*, **4** (2), 236-240.

KREEB K., ABDELALL R., 1970. Water relations, measured as electrical resistance of leaves, and the correlation to growth and production. in Coll. Unesco *Réponse Pl. Fact. Climat* Uppsala, 6 p...

KUPKA J., 1971. The dynamics of the uptake and distribution of phosphorus in the above-ground organs of winter Wheat in the course of ontogenesis (en tchèque). *Rostl. Vyr.*, **17** (5), 529-533.

KUTSCHERA L., 1960. *Würzelatlas*. DLG Verlags GMBH, 574 pp.

LAURA R. D., IDNANI M., 1971. Effect of addition of farm compost on the salt tolerance of Wheat (*Triticum aestivum* L.) towards different alkali salts and their concentrations. *Agrochimica*, **15** (4/5), 336-343.

LEFORT G., SÉBILLOTTE M., 1968. Action du gel sur une culture de Blé d'hiver en fonction du microrelief et de la fertilisation. *Ann. agron.*, **19** (6), 685-697.

LEMÉE G., 1967. *Précis de Biogéographie*. Masson éd. Paris, 358 pp.

LITAV M., HARPER J. L., 1967. A method for studying spatial relationships between the root systems of two neighbouring plants. *Plant and soil*, **26** (2), 389-392.

LOMAS J., SHASHOUA 1970. The effect of rainfall on wheat yields in an arid region. Coll. Unesco. *Réponse pl. Fact. Climat.* Uppsala, 18 pp.

MCDOUGALL B. M., ROVIRA A. D., 1970. Sites of exsudation of ^{14}C-labeled compounds from wheat roots. *New Phytol.*, **69** (4), 999-1003.

MCELGUNN J. D., HARRISON C., C. M., 1969. Formation, elongation and longevity of Barley root hairs (*Hordeum vulgare* L.). *Agron. J.*, **61** (1), 79-81.

MCELGUNN J. D., LAWRENCE T., 1970. A mini Rhizotron for *in situ* observation of seedling development. *Canad. J. Plant Sci.*, **50** (6), 754-756.

MCINTYRE D. S., 1970. The platinum microelectrode method for soil aeration measurement. *Adv. Agron.*, **22** : 235-283.

MAERTENS Cl., 1970. *Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées*. Thèse Dr-Ing., Univ. Toulouse, Ronéotypé 161 pp.

MAIA N. *et al.*, 1967. Étude de mutants « type de développement » isolés dans des variétés de Blé tendres d'hiver. *Ann. Amélior. Pl.*, **17** (2), 195-206.

MALET Ph., 1969. *Essais d'irrigation du Blé tendre* Tobari 66 *avec des eaux salées et sur sol alcalinisé à Bou-Salem, Tunisie*. Centre Rech. Expér. Génie Rural, Tunis, Doc. Techn. 130, 17 pp.

MALET Ph., 1971. *Différences de développement radiculaire suivant l'importance des réserves hydriques disponibles en début de végétation sur un Blé tendre et un coton*. I. N. R. A., Tunisie, Doc. Techn. 52, 19 pp.

MENGEL K., FORSTER H., 1971. Influence de la concentration en potassium de la solution nutritive sur la formation de la récolte, sur la qualité et sur le processus de l'absorption du potassium chez l'avoine (en allemand). *Plant and Soil*, **35** (1), 65-75.

METCALF E. L., *et al.*, 1970. Relationship between crown moisture content and killing temperature for three Wheat and three Barley cultivars. *Crop Sci.*, **10** (4), 362-365.

MILTHORPE F., 1950. Changes in the drought resistance of Wheat seedlings during germination. *Ann. Bot. N. S.*, **14**, 79-89.

MINGEAU M., 1969. Action de la nutrition minérale sur l'économie de l'eau dans la plante. I.-Équilibre absorption-transpiration. *Ann. agron.*, **20** (3), 263-276.

MOLZ F. J., 1971 *a*. *A model study of moisture flow to plant roots*. Thesis. *Diss. Abstr. internat.*, **31** B (11),6728.

MOLZ F. J., 1971 *b*. Interaction of water uptake and root distribution. *Agron. J.*, **63** (4), 608-611.

MONYO J. H., 1968.A genetic analysis of growth in Wheat. Thesis, University of Nottingham. Cité par Troughton et Whittington, in *Root Growth*, Whittington ed.

NAQVI S. M. *et al.*, 1970. Effect of (2-chloroethyl-trimethylammonium chloride) CCC on increasing salt tolerance in Wheat. *J. exper. bot*, **21** (68), 712-713.

NELSON W. W., ALLMARAS R. R., 1969. An improved monolith method for excavating and describing roots. *Agron. J.*, **61** (5), 751-754.

NEWBOULD P. *et al.*, 1969. Intervarietal comparisons of the root systems of winter Wheats. *Agric. Counc. Letcombe Lab., Annu. Rep.*, **20**, 38-40.

MITTLER L. W., 1971. Oat varietal differences in root development at lower leaf nodes. *Crop sci.*, **11** (3), 464-466.

NYE P. H., 1966. The effect of nutrient intensity and buffering power of a soil and the absorption power, size and root hairs of a root, on nutrient absorption by diffusion. *Plant and Soil*, **25**, 81-105.

NYE P. H., FORSTER W. N. M., 1961. The relative uptake of phosphorus by crops and natural fallows from different parts of their root zone. *J. agric. Sci.*, **56**, 299-306.

OLEINIKOVA T. V., KOZHUSHKO N. N., 1970. Evaluation of drought-resistance of Wheat and Barley sorts at seed germination in sucrose solutions with different osmotic pressures (en russe). *Dokl. Vses. Akad. selskokh. Nauk im Lenina*, **8** 5-6.

OMANWAR P. K., ROBERTSON J. A., 1970. Movement of phosphorus to Barley roots growing in soil. *Canad. J. Soil Sci.*, **50** (1), 57-64.

OSMAN A. M., 1971. Root respiration of Wheat plants as influenced by age, temperature and irradiation of shoots. *Photosynthetica*, **5** (2), 107-112.

PAASIKALLIO A., 1970. The measurement of root development in the laboratory (en finnois). *Ann. Agric. fenniae.*, **9** (5), 325-330.

PAQUET J., 1968. Étude de quelques problèmes posés par la sélection pour le nanisme (Type demi-nain) chez le Blé tendre. *Ann. Amélior. Pl.* **18** (3), 237-260.

PAQUET J. *et al.*, 1970. Une céréale d'avenir : le Blé nain. *Bull. anc. Élèves Éc. fr. Meunerie*, 237, 17-133.

PARCEVAUX S. de, 1969. Importance du couvert végétal dans ses relations hydriques avec l'environnement. *Fourrages*, 38, 20-30.

PARCEVAUX S. de, 1972. *Contribution à l'étude des échanges gazeux au niveau des feuilles : rôle des résistances ou longueur de diffusion en Écophysiologie.* Thèse Université Paris-Sud, Ronéotypé, 150 pp.

PAVLYCHENKO T. K., 1937 *a*. The soil-block washing method in quantitative root study. *Canad. J. res.*, **15**, 33-57.

PAVLYCHENKO T. K., 1937 *b*. Quantitative study of the entire root systems of weeds and crop plants under field conditions. *Ecology*, **18**, 62-79.

PAVLYCHENKO T. K., HARRINGTON J. B., 1935. Root development of weeds and crops in competition under dry farming. *Sci. agric.*, **16**, 151-160.

PENDLETON J. W., WELBEL R. O., 1965. Shading studies on winter Wheat. *Agron. J.*, **57** (3), 292-293.

PENMAN H. L., 1956. Evaporation : an introductory survey. *Neth. J. agric. Sci.*, **4**, 9-30.

PERCIVAL J., 1921. *The Wheat plant. A monograph.* Duckworth and Co London.

PÉRIGAUD S., 1967. Effet du manque d'oxygène et de l'excès d'eau au niveau des racines sur la croissance et la nutrition globale de la plante. *Ann. agron.*, **18** (5), 485-506.

PETERSON R. F., 1965. *Wheat Botany, cultivation and utilization.* L. Hill Books, London; Interscience soc., New York, Publ., 422 pp.

PINTHUS M. J., 1965. Spread of the root system as indicator for evaluating lodging resistance of Wheat. *Crop Sci.*, **7** (2), 107-111.

PINTHUS M. J., 1969. Tillering and coronal root formation in some common and durum Wheat varieties. *Crop Sci.*, **9** (3), 267-272.

PINTHUS M. J., ESHEL Y., 1962. Observations on the development of root systems of some Wheat varieties. *Israel J. Agr. Res.*, **12**, 13-20.

PITMAN U. J., 1962. Growth reaction and magnetotropism in roots of Winter Wheat (*Kharkov 22MC*). *Canad. J. Plant. Sci.*, **42**, 430-436.

PRIKRYL K., 1970. The influence of both nitrogenous nutrition and the variety on the relations between the dynamics of growth and the grain production of summer Barley. *Produc. Terrest. Ecosystems, Czechosl. Acad. Sci.*, 197-198.

PRIKRYL K., 1971. Effect of variety on the initial growth and nutrient intake in winter Wheat (en tchèque). *Rostl. vyr.*, **17** (4), 383-389.

PUGSLEY A. T., 1971. A genetic analysis of the spring-winter habit of growth in Wheat. *Austral. J. agric. Res.*, **22** (1), 21-31.

RIVIÈRE J., 1960. Étude de la rhizosphère du Blé. *Ann. agron.*, **11**, 397-440.

RIVIÈRE J., 1963. Rhizosphère et croissance du Blé. *Ann. agron.*, **14**, 619-653.

ROVIRA A. D., BOWEN G. D., 1970. Translocation and loss of phosphate along roots of Wheat seedlings. *Planta*, **78**, 15-25.

ROGERS W. S., 1968. The East-Malling root observation laboratories, in *Root growth*, Whittington Ed. (*loc. cit.*), 361-376.

ROY N. N., *et al.*, 1970. Influence of temperature on the growth of Wheat coleoptile. *Indian J. agric. Sci.*, **40**, 948-953.

SALIM M. H. *et al.*, 1965. Root development of Wheat, Oats and Barley under conditions of soil moisture stress. *Agron. J.*, **57**, 603-607.

SANDE-BAKHUYZEN H. L., van de, 1937. *Studies on Wheat grown under constant conditions, a monograph on growth.* Food Res. Institute Ed., 400 pp.

SARIC M., PETROVIC A., 1969. Study on variety specific response to mineral nutrition in Wheat. *Contemp. Agri.*, **17**, 25, 247-254.

SCHEIBE A. et ELERMANN M., 1967. Sur l'influence de la lumière et de la température sur le tallage des céréales d'été (en allemand). *Z. Acker u. Pflanzenbau.*, **126**, 197-228.

SCHIMANSKY Ch., MARSCHNER H., 1971. Suitability of ^{86}Rb as a tracer for potassium in studies rela-

ting to potassium uptake by Maize, Sugar beet and four varieties of Barley. *Z. Pflanzenernähr.*, **129**, 141-147.

SCOTT-RUSSELL R., SANDERSON J., 1967. Nutrient uptake of different parts of the intact roots of plants. *J. expert. bot.*, **18**, 491-508.

SHARMA R. B., *et al.*, 1971. Effect of varying bulk density of surface and sub-surface soil on Wheat growth under field conditions. *Indian Soc. Soil Sci., Internat. Symp. on soil fertility.*, T. I, 519-527.

SHIMURA K., 1970. Root research Phytotron. *J. A. R. Q.*, **5** (4), 54-57.

SCHUURMAN J. J., GOEDEWAAGEN M. A. J., 1965. *Methods for the examination of root systems and roots.* Centre Agric. Publ. Doc. Wageningen, 86 pp.

SCHUURMAN J. J., BOER J. J. H. de, 1970. The developmental pattern of roots and shoots of Oats under favourable conditions. *Neth. J. agric. Sci.*, **18**, 168-181.

SCHUURMAN J. J., KNOT L., 1970. Comparison of root development of three herbage grasses and spring Wheat (en néerlandais). *Versl. Landbouwk. Onderz.*, **745**, 15 pp.

SINGH N. P., DASTANE N. G., 1970. Root growth characters and water use patterns of different Wheat varieties. *Indian J. agric. Sci.*, **15**, 346-349.

SKOPIK P., GIBALA O., 1970. The relationship between the concentration and the ratio of phosphoric acid and nitrogen in plants in the beginning of vegetation of the yield of cereals. *Produc. Terrest. Comm. Czechosl. Acad. Sci.*, 191-192.

SMITH A. N., 1969. Effects of daylength and time of application of phosphorus on growth and grain yield of Wheat. *Physiol. Plant.*, **22**, 371-378.

SPRATT E. D., GASSER J. K. R., 1970 *a*. Effect of ammonium and nitrate forms of nitrogen and restricted water supply on growth and nitrogen uptake of Wheat. *Canad. J. Soil Sci.*, **50**, 263-273.

SPRATT E. D., GASSER J. K. R., 1970 *b*. Effects of fertilizers nitrogen and water supply on distribution of dry matter and nitrogen between the different parts of Wheats. *Canad. J. Plant Sci.*, **50**, 613-625.

STANKOV M. Z., 1968. Méthodes d'étude du système racinaire des plantes (en russe). *Selek. Semenov.*, **2**, 25-27.

STARZYCKI S., GIELO S., SOWA W., 1964. Recherches sur l'absorption de ^{32}P par diverses variétés de Blés pendant les premiers stades de leur croissance (en polonais). *Hodowla Rosl. Aklim. Nasienn.*, **8**, 255.

STOJKOVIC K. *et al.*, 1968. The absorption capacity of some winter Wheat varieties during sprouting. *Contemp. agric.*, **16** (12), 25-38.

STREBEYKO P. *et al.*, 1963. Dynamics of growth and development in spring Wheat. *Physiol. Plant.*, **16**, 359-367.

STREBEYKO P. *et al.*, 1967. The rate of growth of spring Wheat as related to its yields (en polonais). *Hodowla. Rosl. Aklim. Nasienn.*, **11**, 625-636.

STREET H. E., 1966. The physiology of root growth. *Annu. Rev. Plant. Physiol.*, **17**, 315-344.

SUSKEVIC M., STRANAK A., The influence of the physical conditions of soil on the growth of the winter Wheat root system (en tchèque). *Rostl. vyr.*, **16**, 331-338.

TANAKA Y., 1971. *Root hair growth in relation to root elongation and calcium supply.* Thesis. *Diss. Abstr. internat.*, **31** B, 6366.

TARDIEUX-ROCHE A., TARDIEUX P., 1970. La biosynthèse des phosphates condensés par la microflore du sol et son rôle dans la nutrition des végétaux. *Ann. agron.*, **21**, 305-314.

TAVCAR A., KENDELIC V., 1969. Development of root in 14-day-old Wheat plants in relation to some useful characters of the adult plants. *Contemp. agric.*, **17**, 11-12, 52-58.

TAYLOR H. M., 1969. The rhizotron at Auburn, Alabama. A plant root observation laboratory. *Auburn Univ. Agric. Expt. Sta.*, Cir. 171, 9 pp.

TAYLOR H. M. *et al.*, 1970. Measurement of soil-grown roots in a rhizotron. *Agron. J.*, **62**, 807-809.

THIEN S. J., 1971. *Characterization of nitrogen enhanced phosphorus uptake and translocation.* Thesis. *Dissert. Abstr. internat.*, **32** B, 670.

THORNTHWAITE C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Rev.*, 55-94.

THORUP J. T., 1969. pH effect on root growth and water uptake by plants. *Agron. J.*, **61**, 225-227.

TIWARI Y. D., *et al.*, 1970. Effect of surface mulch in the yield of Wheat. *Indian J. agric. Sci.*, **40**, 203-206.

TROUGHTON A., 1957. *The underground organs of Herbage grasses.* Bull. 44, Commw. Bur. Pastures and Field Crops. Hurley, Berckshire, 163 pp.

TROUGHTON A., 1962. *The roots of temperate cereals* (*Wheat, Barley, Oats and Rye*). Commonw. Bur. Pastures and Field Crops. Hurley, Berks. mimeograph., 91 pp.

TROUGHTON A., WHITTINGTON W. J., 1968. The significance of genetic variation in root systems. in : *Root growth. Proc. 15th Easter school agric. Sci.* Nottingham. Whittington ed., 296-314.

TSIGANKOV I. G., 1970. The specificity of the development of root systems in spring Wheat (en russe). *Selskokh. Biol.*, **5**, 337-340.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule simplifiée mise à jour. *Ann. agron.*, **12**, 13-49.

UDOVENKO G. V. *et al.*, 1970. Changes of root cell ultrastructure under salinization in plants of different salt resistances. *Soviet Plant Physiol.*, **17**, 813-818.

UGLOV P. D., VOLKOVA A. M., 1970. Varietal difference in heat resistance of spring Wheats (en russe). *Bot. Genet. Selek.*, **41**, 98-102.

VAN DOBBEN W. H., 1965. The photoperiodical reaction of Wheat in the Mediterranean region and in North western Europe. *Mediterranea* (5), 54-60.

VARADE S. B. *et al.*, 1970. Influence of temperature, light intensity and aeration on growth and root porosity of Wheat. *Agron. J.*, **62**, 505-507.

VARTAPETIAN B. B., 1970. Aeration of roots in relation to molecular oxygen transport in plants. Coll. Unesco. *Réponse pl. fact. Climat.*, Uppsala, 13 pp.

VINCENT A., GOUJON Cl., 1964. Résistance au froid chez le Blé. I.-Association entre vernalisation et résistance par endurcissement. *Ann. Amélior. Pl.*, **14**, 39-56.

VOORHEES W. B., 1971. Some effects of aggregate structure heterogeneity on root growth. *Soil. Sci. Amer. Proc.*, **35**, 638-643.

WATSON D. J. *et al.*, 1963. Analysis of growth and yield of winter and spring Wheats. *Ann. Bot. N. S.*, **27**, 1-22.

WELBANK P. J., WILLIAMS E. D., 1968. Root growth of Barley crop estimated by sampling with portable powered soil-coring equipment. *J. appl. Ecol.*, **5**, 477-481.

WHITFIELD C. J., SMIKA D. E., 1971. Soil temperature and residue effect on growth components and nutrient uptake of four Wheat varieties. *Agron. J.*, **63**, 297-300.

WHITTINGTON W. J., 1968. *Root growth. Proc. 15th Easter School agric. Sci.* Nottingham. Butterworth London, 1969. 450 pp.

WILLIAMS R. F., 1960. The physiology of growth in the Wheat plant. I.-Seedling growth and the pattern of growth at the shoot apex. *Austr. J. biol. Sci.*, **13**, 401-428.

WILLIAMS R. F., WILLIAMS C. N., 1968. Physiology of growth in the Wheat plant. IV.-Effects of daylength and light-energy level. *Austr. J. biol. Sci.*, **21**, 835-854.

YANG S. J., 1971. Availability of soil water to Wheat plants. *Dissert. Abstr. internat.*, **31** B, 4446-4447. Thesis, 263 pp.

YANG S. J., JONG E. de, 1971. Effect of soil water potential and bulk density on water uptake patterns and resistance to flow of water in Wheat plant. *Canad. J. Soil Sci.*, **51**, 211-220.

ZADONTSEV A. I. *et al.*, 1970. Ontogenetic changes in the formation of the root system of winter Wheat. *Soviet Plant Physiol.*, **17**, 87-90.

ZEMANEK M., 1971. The effect of growth retarder CCC on water regime and on dry-matter production in spring Wheat under the conditions of differentiated supplies of water to the plants (en tchèque). *Rostl. vyr.*, **17**, 541-555.

Ann. agron., 1973, **24** (2), 277-285.

MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE

L'ACTIVATION DE L'AZOTE MOLÉCULAIRE PAR LE SYSTÈME DU TITANOCÈNE

J.-C. MARCHON

Laboratoire de Chimie analytique associé au C. N. R. S.,
Université de Paris VI,
10, rue Vauquelin,
75231 Paris Cedex 05

RÉSUMÉ

La chimie de l'azote moléculaire a connu depuis quelques années des développements importants dont on retrace les étapes principales. Après un bref tour d'horizon des réactions dans lesquelles l'azote s'unit à des composés des métaux de transition pour donner des complexes de coordination stables, on expose plus en détail les recherches récentes sur la fixation de l'azote et sa réduction en ammoniac dans les conditions ambiantes par un complexe du titane, le titanocène. On souligne le parallèle entre les réactions du titanocène et celles de la nitrogénase.

INTRODUCTION

L'année 1965 restera sans doute une date importante dans l'histoire de la chimie. Pour la première fois, deux chercheurs canadiens, ALLEN et SENOFF, caractérisaient un complexe du ruthénium contenant une molécule d'azote liée par coordination à l'atome métallique (ALLEN et SENOFF, 1965) :

$$[Ru^{II}(NH_3)_5N_2]Cl_2$$

Une telle découverte n'est pas de celles qui passent inaperçues. Tous les chimistes savent que la molécule d'azote est douée d'une exceptionnelle stabilité et d'une grande inertie chimique. Son potentiel d'ionisation élevé (15,58 *eV*) et son énergie de liaison importante (225 kcal/mole) en témoignent clairement. Ainsi ne connaissait-on avant 1965 que de rares réactions de l'azote moléculaire à température ordinaire, avec des réducteurs très énergiques comme le lithium métallique. La réaction facile de l'azote avec des complexes des métaux de transition en solution aqueuse ouvrait donc des perspectives nouvelles.

I. — LES COMPLEXES DE L'AZOTE MOLÉCULAIRE

Outre l'intérêt qu'elle présente du point de vue théorique, la possibilité de faire entrer la molécule d'azote dans des combinaisons métalliques complexes semblait promettre des développements d'une grande importance pratique. C'est que l'atmosphère constitue une réserve immense d'azote, mais que les processus artificiels de fixation de ce gaz sont coûteux et d'un rendement médiocre. Or, la fixation de l'azote n'est rien d'autre que sa réduction en ammoniac, donc la possibilité de produire des engrais azotés, c'est-à-dire en fin de compte des aliments. L'ammoniac constitue par ailleurs une matière première commode pour la fabrication d'acide nitrique, lui-même produit de base d'un grand nombre de substances azotées importantes. Si donc il devenait possible de transformer l'azote en ammoniac dans les conditions ambiantes, l'industrie chimique de l'azote ne tarderait pas à tirer parti de la découverte.

La publication des deux Canadiens, on s'en doute, a suscité de nombreux travaux : après cinq ans, les complexes de l'azote moléculaire avec des composés des métaux de transition se comptent maintenant par dizaines, et les revues bibliographiques abondent à leur sujet (Allen et Bottomley, 1968 ; Borod'ko et Shilov, 1969 ; Büttner, 1969 ; Chatt, 1969 ; Fergusson et Love, 1970 ; Martino et Sajus, 1970 ; Murray et Smith, 1968). Mais l'espoir qu'elle a fait naître n'a été que de courte durée : la molécule d'azote engagée dans ces combinaisons s'est révélée aussi peu réactive que la molécule libre. Elle est en particulier inapte à la réduction dans les conditions ambiantes. On ne pouvait donc pas attendre de cette nouvelle voie de recherches qu'elle amène des progrès importants dans la fixation de l'azote.

Cependant, les complexes de l'azote moléculaire continuent d'exciter la curiosité des chimistes, et de nombreux travaux leur sont consacrés. C'est une impressionnante moisson de composés nouveaux qui a été rassemblée en l'espace de cinq ans, mais l'on ne peut en retenir que peu d'idées directrices.

On constate d'abord que les complexes de l'azote moléculaire se forment avec des métaux de transition à un degré d'oxydation assez bas. Pour les préparer, on part d'un sel du métal à un degré d'oxydation supérieur, qu'on réduit par un réducteur convenable, puis qu'on fait réagir avec l'azote moléculaire ou avec un composé de l'azote. La plupart des métaux de transition ont été essayés, ainsi que les réducteurs les plus variés.

Il a également été remarqué que la fréquence de vibration infrarouge de la liaison $N \equiv N$, dans les complexes de l'azote moléculaire, est beaucoup plus basse que celle que l'on observe dans le spectre Raman de l'azote gazeux. Cet abaissement de fréquence est l'indice d'un affaiblissement de la liaison entre les deux atomes d'azote, provoqué par un transfert des électrons de l'atome métallique vers les orbitales antiliantes de la molécule d'azote (Chatt, Dilworth *et al.*, 1969). On peut donc penser que s'il était possible de synthétiser un complexe dans lequel ce transfert est suffisamment important, l'énergie de la liaison $N \equiv N$ y serait devenue assez faible pour qu'on puisse la rompre à la température ordinaire. A partir des complexes nitrurés qui se formeraient alors, on passerait facilement à l'ammoniac.

II. — LA RÉDUCTION CATALYTIQUE DE L'AZOTE A TEMPÉRATURE ORDINAIRE

De fait, une voie de recherches parallèle à celle que nous venons de décrire devait amener, elle aussi, quelques résultats très encourageants. Deux chimistes russes, Vol'pin et Shur, décrivent en 1966 la réaction de l'azote moléculaire, en solution organique, avec divers complexes des mé-

taux de transition (Vol'pin et Shur, 1966) et en particulier des catalyseurs de Ziegler-Natta. L'azote gazeux est absorbé lorsque la solution contient un grand excès d'un réducteur (organomagnésien, métal alcalin, naphtalène sodium). L'hydrolyse du mélange réactionnel fournit alors de l'ammoniac en quantité presque stœchiométrique.

Il s'agit là d'une catalyse, au sens thermodynamique du terme, du processus de fixation. En effet, le bilan énergétique de la réduction de l'azote en ammoniac est favorable à la réaction de l'azote avec l'hydrogène ; mais une énergie d'activation élevée interdit au système d'évoluer spontanément, à température ordinaire, vers la formation d'ammoniac. Ainsi l'industrie est-elle obligée d'amener le mélange azote-hydrogène à température élevée, dans le procédé Haber, pour surmonter cette énergie d'activation. Les catalyseurs découverts par Vol'pin et Shur, au contraire, provoquent l'activation de l'azote par des interactions chimiques : l'énergie d'activation est considérablement diminuée pour l'azote combiné au catalyseur, qui peut ainsi être réduit dans les conditions ambiantes.

Un grand nombre de chercheurs se sont lancés dans la voie ouverte par les travaux de Vol'pin et Shur, et les revues bibliographiques ne manquent pas non plus dans ce domaine (Borod'ko et Shilov, 1969 ; Büttner, 1969 ; Chatt, 1969 ; Collman, 1968 ; Henrici-Olivé et Olivé, 1969 ; Martino et Sajus, 1970 ; Uchida, 1970 ; Van Tamelen, 1970). La plupart des recherches sont axées sur le mécanisme de la réaction de l'azote avec le dichlorotitanocène. Ce composé organométallique de type sandwich (fig. 1)

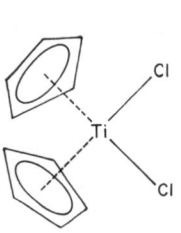


Fig. 1

est en effet le catalyseur le plus efficace qui ait été trouvé jusqu'ici, et c'est à l'étude de ses réactions que nous consacrerons la suite de cet exposé.

L'ensemble des opérations qui mènent de l'azote à l'ammoniac, en présence de dichlorotitanocène (abrégé en $Cp_2Ti^{IV}Cl_2$), peut être résumé par la séquence suivante :

— On ajoute un grand excès de réducteur à la solution de $Cp_2Ti^{IV}Cl_2$ dans un solvant organique convenable (éther, tétrahydrofuranne, diméthoxyéthane, benzène). Le réducteur utilisé peut être un organo-magnésien, un organo-alcalin, un métal alcalin ou alcalino-terreux. Le stade ultime de réduction correspond au degré d'oxydation + 2 du titane, c'est-à-dire au titanocène Cp_2Ti^{II} (Doisneau et Marchon, 1971). La solution ainsi obtenue est dite « solution réduite ».

— Lorsque cette opération a été effectuée sous atmosphère d'azote, on constate que le gaz est absorbé par la solution réduite. L'espèce active est le titanocène (Bercaw *et al.*, 1972).

— Le produit d'addition titanocène-azote est réduit par l'excès de réducteur.

— Si l'on effectue alors l'hydrolyse de la solution organique, on décèle une quantité d'ammoniac approximativement proportionnelle à celle du dichlorotitanocène introduit (environ une molécule d'ammoniac par molécule de dichlorotitanocène).

De nombreuses études ont été consacrées à l'analyse des étapes intermédiaires de ce processus. On en trouvera une présentation claire dans les diverses mises au point publiées sur ce sujet, notamment celles de Brintzinger (Bercaw *et al.*, 1972), de Henrici-Olivé et Olivé (1969) et de Van Tamelen (1970). Il nous paraît donc superflu d'exposer une nouvelle fois un bilan détaillé de ces recherches. Notre but est plutôt d'esquisser ici un parallèle entre les caractéristiques du système catalytique que nous venons de décrire et celles du métabolisme biochimique de l'azote moléculaire.

III. — LA FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE

Il faut en effet mentionner que la découverte de Vol'pin et Shur intéresse les biochimistes au moins autant que les chimistes. Car la fixation biologique de l'azote atmosphérique, entre autres domaines où la nature défie encore l'imitation, constitue une énigme dont ce genre de travaux paraît devoir hâter la solution. On sait que certaines bactéries, telles que *Clostridium pasteurianum*, *Azotobacter vinelandii*, etc., ainsi que certaines associations symbiotiques végétal-bactérie comme les nodosités des racines de trèfle, fixent l'azote atmosphérique et le réduisent en ammoniac dans les conditions ambiantes. Or les biochimistes ont montré que l'enzyme qui catalyse l'opération, la nitrogénase, contient précisément dans sa molécule des métaux de transition, le fer et le molybdène (tabl. 1).

TABLEAU I

Composition de la nitrogénase

	Fraction F_1	Fraction F_2
Masse molaire	300 000	68 000
Nombre d'atomes Mo....	1 à 2	0
Nombre d'atomes Fe	10 à 16	2
Nombre d'atomes S (sous forme S^{2-})	10 à 16	2

Il est tentant de rapprocher ces résultats des travaux suscités par la découverte de Vol'pin et Shur, et d'attribuer à la présence de métaux de transition dans la nitrogénase l'activité de cette enzyme. Dans cette optique, les catalyseurs de Vol'pin et Shur peuvent être considérés comme des modèles de la nitrogénase : en d'autres termes, l'étude de leurs réactions chimiques semble pouvoir éclairer le mécanisme du processus biochimique de fixation de l'azote.

IV. — LE TITANOCÈNE CONSIDÉRÉ COMME MODÈLE DE LA NITROGÉNASE

De fait, il existe une analogie assez frappante entre le processus catalytique artificiel et le processus naturel, comme l'illustre le parallèle entre le dichlorotitanocène et la nitrogénase.

D'après les travaux des biochimistes (Hardy et Burns, 1968), les quatre caractéristiques principales du système enzymatique dans lequel s'insère la nitrogénase sont les suivantes :

1. Ce système réduit l'azote en ammoniac [1]. D'autres substrats peuvent être réduits : C_2H_2, HCN, HN_3, CH_3NC, etc.

[1] Ce processus consomme de l'énergie sous forme adénosine triphosphate (ATP).

2. En l'absence d'azote, le système est le siège d'un dégagement d'hydrogène (1). Dans la littérature anglo-américaine, ce processus est connu sous le nom de « ATP-dependent H_2 evolution ».
3. L'hydrogène constitue pour l'enzyme un substrat compétitif de l'azote.
4. La réduction de l'azote est inhibée par l'oxyde de carbone.

L'ensemble de ces quatre propriétés est illustré par la figure 2.

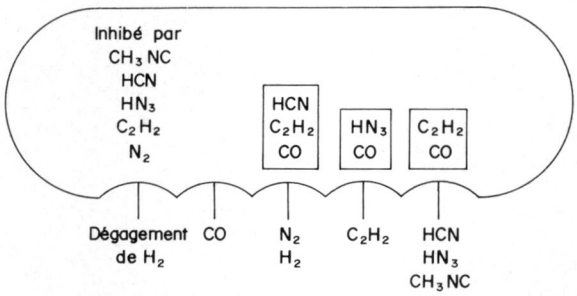
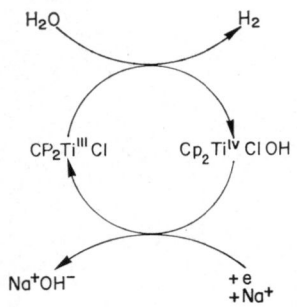


FIG. 2. — *Interaction des substrats et des inhibiteurs dans la nitrogénase* (d'après BURRIS, 1969)

Examinons maintenant quelques propriétés chimiques du titanocène, telles qu'elles apparaissent d'après les travaux effectués depuis quelques années sur ce composé organométallique. Le précurseur le plus commode du titanocène est le dichlorotitanocène, un composé cristallisé de couleur rouge, où le titane est au degré d'oxydation + 4, et que l'on dissout facilement dans les solvants éthérés. Les solutions de Cp_2TiCl_2 peuvent être réduites jusqu'au degré d'oxydation + 2 du titane (DOISNEAU et MARCHON, 1971), c'est-à-dire jusqu'au titanocène (2), selon les réactions :

$$Cp_2Ti^{IV}Cl_2 \xrightarrow{+e} Cp_2Ti^{III}Cl \xrightarrow{+e} Cp_2Ti^{II} \qquad (1)$$

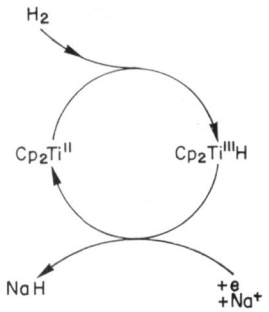
Le monochlorotitanocène $Cp_2Ti^{III}Cl$ catalyse la réduction de l'eau, c'est-à-dire la formation d'hydrogène, selon le schéma ci-dessous (MARCHON et BARBOSA, 1972) :



(2)

Le titanocène Cp_2Ti^{II} catalyse la réduction de l'hydrogène en hydrure de sodium (VAN TAMELEN et FECHTER, 1968 ; BAKER et SCHURIG, 1969). Le processus peut être symbolisé par le cycle suivant (MARCHON et BARBOSA, sous presse) :

(1) Ce processus consomme de l'énergie sous forme d'adénosine triphosphate (ATP).
(2) Pour simplifier l'écriture, nous décrivons les dérivés du titanocène par des formules brutes monomères, bien qu'il ait été montré que certains de ces composés sont des dimères.



(3)

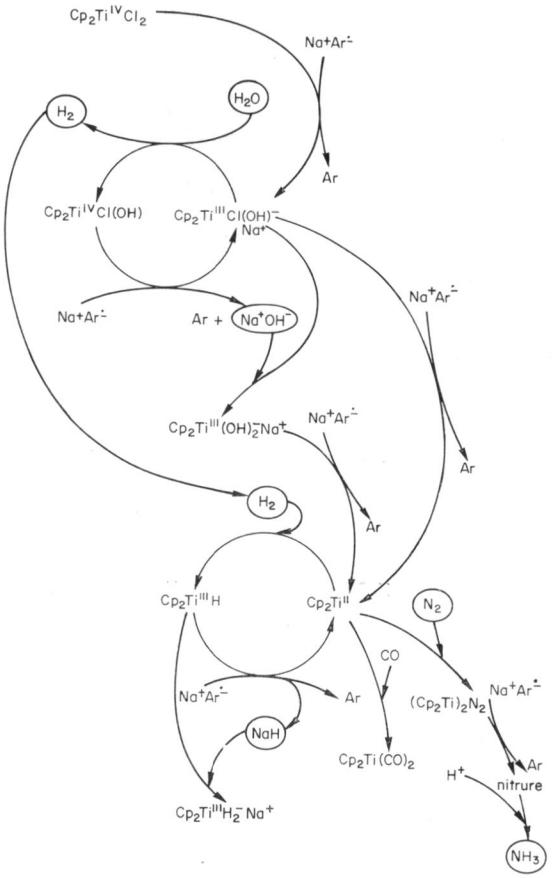


FIG. 3. — *Réactions de l'eau, de l'hydrogène, de l'azote et de l'oxyde de carbone dans le système du titanocène*

(d'après MARCHON et BARBOSA, sous presse)

Il paraît très probable que le titanocène est l'espèce sur laquelle l'azote vient se fixer par coordination dans les expériences de VOL'PIN et SHUR. Le composé d'addition $[Cp_2Ti]_2N_2$ a d'ailleurs été mis en évidence (BERCAW *et al.*, 1972). Ce complexe est réduit par les réducteurs éner-

giques, et l'hydrolyse du mélange réactionnel fournit alors de l'ammoniac. L'ensemble de ces réactions peut être symbolisé par le schéma :

$$Cp_2 Ti^{II} \xrightarrow{+N_2} (Cp_2 Ti)_2 N_2 \xrightarrow{+ne} ? \xrightarrow{+H_2O} NH_3 \qquad (4)$$

Enfin, le titanocène donne un composé d'addition avec l'oxyde de carbone (CALDERAZZO *et al.*, 1967), selon la réaction :

$$Cp_2 Ti^{II} + 2\,CO \longrightarrow Cp_2 Ti(CO)_2 \qquad (5)$$

Si l'on compare les réactions (2), (3), (4) et (5) des dérivés du titanocène avec les propriétés de la nitrogénase dénotées 2, 3, 1 et 4, respectivement, on peut constater que, du point de vue formel, l'analogie est parfaite. Une solution organique de dichlorotitanocène à laquelle on ajoute un réducteur énergique donne lieu aux mêmes réactions que la nitrogénase : réduction de l'azote en ammoniac, réduction des traces d'eau résiduelle en hydrogène, inhibition de la formation d'ammoniac par l'oxyde de carbone, réduction compétitive de l'hydrogène (fig. 3).

CONCLUSION

On peut se demander jusqu'où cette analogie pourra être poursuivie. Le mécanisme de la réduction de l'azote est-il le même dans le processus biochimique et dans la réaction catalysée par le titanocène ? Il est pour l'instant impossible de répondre à une telle question, par l'affirmative ni par la négative. On peut pourtant penser que, tant que l'analogie n'aura pas été démentie par les résultats expérimentaux, elle pourra servir de ligne directrice pour les recherches futures.

La chimie du titanocène et des composés organométalliques doués des mêmes propriétés catalytiques apportera-t-elle la clé de l'énigme posée par la fixation biologique de l'azote ? Même si cet espoir ne se réalisait pas, les recherches effectuées dans ce domaine auront du moins l'intérêt d'ouvrir aux chimistes des voies nouvelles pour la synthèse de produits d'une grande importance pratique, tels que l'ammoniac, l'hydrazine ou les amines.

Reçu pour publication en novembre 1972.

SUMMARY

ACTIVATION OF MOLECULAR NITROGEN USING « TITANOCENE »

A survey is made of the main stages that brought about over the latter years a substantial development of molecular-nitrogen chemistry.

After briefly outlining the reactions wherein nitrogen coalesces with transition-metal compounds to yield stable coordinate complexes, research into nitrogen fixation, and reduction under environmental conditions by means of a titanium complex, « titanocene », is gone into, emphasizing the similarity of the « titanocene » and nitrogenase reactions, respectively.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE AKTIVIERUNG DES MOLEKULAREN STICKSTOFFES DURCH DAS TITANOCENE-SYSTEM *(Instandsetzung)*

Seit einigen Jahren hat die Chemie des molekularen Stickstoffes wichtige Entwicklungen erfahren, deren Hauptetappen man vergegenwärtigt.

Nach einem kurzen Ueberblick der Reaktionen, in welchen sich der Stickstoff mit den Uebergangsmetallmischungen verbindet, um stabile Koordinationskomplexe zu erschaffen, werden die neuzeitigen Forschungsarbeiten ausführlich über die Fixierung des Stickstoffes und über seine Umwandlung in Ammoniak in Umweltsbedingungen durch ein Titankomplex, des Titanocenes, aufgeführt.

Man unterstreicht eine Parallele zwischen den Reaktionen des Titanocenes und denen der Nitrogenase.

РЕЗЮМЕ

Активация молкулярного азота системой титаноцена.

Ж. МАРШОН.

Химия молекулярного азота сильно развилась в последнее время, и автор перечисляет главные этапы этого развития.

После краткого перечня реакций, в которых азот соединяется с переходными металическими соединениями, образовывая прочные комплексы координации, подробно рассматриваются более недавние исследования о фиксации азота и его восстановлении в аммониак титановым комплексом — титаноценом в окружающих условиях, и проводится параллель между реакциями титаноцена и нитрогеназы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLEN A. D., BOTTOMLEY F., 1968. Inorganic nitrogen fixation. Nitrogen compounds of the transition metals. *Accounts Chem. Res.*, **1**, 360-365.

ALLEN A. D., SENOFF C. V., 1965. Nitrogenopentaminеruthenium (II) complexes. *Chem. Comm.*, 621-622.

BAYER D., SCHURIG V., 1969. Stickstoff-Fixierung und Reduktion zu Ammoniak mit metallorganischen Katalysatoren. *Chem. Ber.*, **102**, 3378-3390.

BERCAW J. E., MARVICH R. H., BELL L. G., BRINTZINGER H. H., 1972. Titanocene as an intermediate in reactions involving molecular hydrogen and nitrogen. *J. Am. Chem. Soc.*, **95**, 1219-1238.

BOROD'KO Yu. G., SHILOV A. E., 1969. Complexes of molecular nitrogen. *Russ. Chem. Rev.*, **38**. 355-374.

BURRIS R. H., 1969. Progress in the biochemistry of nitrogen fixation. *Proc. Roy. Soc.* (B), **172**, 339-354.

BÜTTNER W., 1969. Chemische Aktivierung von molekularem Stickstoff durch übergangsmetall-komplexe. *Z. Chem.*, **9**, 219-227.

CALDERAZZO F., SALZMANN J. J., MOSIMANN P., 1967. Investigation of some *bis*(cyclopentadienyl) derivatives of titanium. *Inorg. Chim. Acta*, **1**, 65-67.

CHATT J., 1969. Recent developments in the chemistry of nitrogen fixation. *Proc. Roy. Soc.* (B) **172**, 327-337.

ATT J., DILWORTH J. R., RICHARDS R. L., SANDERS J. R., 1969. Chemical evidence concerning the function of molybdenum in nitrogenase. *Nature*, **224**, 1201-1202.

COLLMAN J. P., 1968. Patterns of organometallic reactions related to homogeneous catalysis. *Accounts Chem. Res.*, **1**, 136-143.

DOISNEAU R. G., MARCHON J. C., 1971. Comportement électrochimique du chlorure de *bis* (π-cyclopentadienyl)titane(IV), catalyseur de la réduction de l'azote en ammoniac dans le dimethoxyéthane. *J. Electroanal. Chem.*, **30**, 487-498.

FERGUSSON J. E., LOVE J. E., 1970. A survey of dinitrogen complexes of the transition metals. *Rev. Pure Appl. Chem.*, **20**, 33-48.

HARDY R. W. F., BURNS R. C., 1968. Biological nitrogen fixation. *Ann. Rev. Biochem.*, **37**, 331-358.

HENRICI-OLIVÉ G., OLIVÉ S., 1969. Non-enzymatic activation of molecular nitrogen. *Angew. Chem. Intern. Edit. Engl.*, **8**, 650-659.

MARCHON J.-C., BARBOSA A., 1972. Réduction catalytique de l'eau dans le tétrahydrofuranne en présence de dichlorotitanocène. *C. R. Acad. Sci.*, Paris (C), **274**, 1438-1441.

MARCHON J.-C., BARBOSA A. Reaction mechanisms of a nitrogenase model. Water and hydrogen as reducible substrates of the titanocene system. *Anal. Letters* (sous presse).

MARTINO G., SAJUS L., 1970. Activation de l'azote par les complexes des métaux de transition. *Revue Inst. Fr. Pétrole*, **25**, 36-55.

MURRAY R., SMITH D. C., 1968. The activation of molecular nitrogen. *Coordin. Chem. Rev.*, **3**, 429-470.

VAN TAMELEN E. E., 1970. Design and development of an organic-inorganic system for the chemical modification of molecular nitrogen under mild conditions. *Accounts Chem. Res.*, **3**, 361-367.

VAN TAMELEN E. E., FECHTER R. B., 1968. The titanium-naphtalene-catalyzed synthesis of sodium hydride from the elements at room temperature and atmospheric pressure. *J. Am. Chem. Soc.*, **90**, 6854.

VAN TAMELEN E. E., FECHTER R. B., SCHNELLER S. W., BOCHE G., GREELEY R. H., ÅKERMARK B. 1969. Titanium (II) in the fixation-reduction of molecular nitrogen under mild conditions. *J. Am. Chem. Soc.*, **91**, 1551-1552.

VAN TAMELEN E. E., SEELEY D., SCHNELLER S., RUDLER H., CRETNEY W., 1970. Intermediates in the titanocene-promoted fixation-reduction of molecular nitrogen. *J. Am. Chem. Soc.*, **92**, 5251-5253.

UCHIDA Y., 1970. Nitrogen fixation. *Kagaku To Seibutsu*, **8**, 202-210.

VOL'PIN M. E., SHUR V. B., 1966. Nitrogen fixation by transition metal complexes. *Nature*, **209**, 1236.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

Agronomie.

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24. N° 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (3), 287-305.

ASSIMILATION NETTE, UTILISATION DE L'EAU ET MICROCLIMAT D'UN CHAMP DE MAÏS

IV. — Évolution diurne de la résistance stomatique et du déficit de saturation des feuilles ; conséquences sur la fixation du CO_2

J. Čatský*, P. Chartier et A. Djavanchir**

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

**Académie tchécoslovaque des Sciences,*
Institut de Botanique expérimentale
Flemingovo 2, Praha 6 (Tchécoslovaquie)

***Faculté d'Agronomie,*
Université de Tabriz,
Tabriz, (Iran)

RÉSUMÉ

Les variations diurnes du déficit de saturation en eau et de la résistance stomatique des différentes feuilles d'une culture de Maïs ont été mesurées. L'effet de la lumière sur l'ouverture des stomates est mis en évidence (fig. 2). Une certaine dissociation entre le degré d'ouverture des stomates et la teneur en eau des feuilles apparaît nettement. Tout au long de la journée, cela se traduit par un phénomène d'hystérésis si l'on porte sur un graphique la résistance stomatique en fonction du déficit de saturation (fig. 11).

On a également étudié la relation entre le déficit en eau, la résistance stomatique et la fixation du CO_2 par la feuille, ainsi que quelques conséquences de l'irrigation du Maïs sur la surface foliaire, le poids sec et le poids frais des feuilles.

INTRODUCTION

Le déficit en eau des plantes est l'un des facteurs essentiels de la réduction des rendements agricoles (voir les revues bibliographiques récentes de Craftz (1968), Gates (1968), Kramer (1969), Slatyer (1969, 1970 *a*), Walter et Kreeb (1970)).

Cet effet est aussi observé sur le Maïs (ROBELIN, 1963 ; CLAASSEN et SHAW, 1970) bien que cette plante soit considérée comme étant tolérante à l'égard de la sécheresse.

La teneur en eau des feuilles, bilan de la transpiration et de l'absorption de l'eau par les racines au cours de la période précédant une mesure, s'accompagne de modifications :

— de la régulation stomatique,
— de l'expansion du feuillage (nombre et propriétés caractéristiques de chaque feuille),
— des conditions de migration des ions minéraux, du gaz carbonique et des substances élaborées.

L'eau agit non seulement sur l'assimilation nette et la croissance du Maïs, mais aussi sur son développement (ROBELIN, 1963 ; SHINN et LEMON, 1968). C'est la connaissance de l'ensemble de ces actions qui permet de répondre aux préoccupations concrètes des producteurs. Dans cet article toutefois, seuls les points suivants ont pu être abordés :

— variation du déficit en eau des feuilles au cours de la journée,
— variation de la régulation stomatique des feuilles en place en fonction de l'heure du jour, du numéro d'ordre de la feuille et de l'éclairement qu'elle reçoit,
— modifications des caractéristiques du feuillage avec ou sans irrigation,
— influence du déficit de saturation en eau des feuilles sur l'assimilation nette.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

La culture de Maïs (*Zea mays* L., hybride *I. N. R. A., F7 × EP 1*), cultivée à La Minière près de Versailles, a une densité moyenne de semis égale à 90 000 pieds ha^{-1}. Une partie est irriguée de façon à combler le déficit journalier (pluie moins évapotranspiration). L'autre partie n'est pas irriguée. On trouvera tableaux 1 et 2 les caractéristiques climatiques des périodes de mesure en 1969 et 1970.

TABLEAU I

Pluviométrie et température moyenne durant l'été 1969 à « La Minière »

Le déficit théorique cumulé [Σ(ETP — P)] est égal à 77 mm le 1er juin et à 175 mm le 20 août

	11-20 juin	21-30 juin	1-10 juillet	11-20 juill.	21-31 juill.	1-10 août	11-20 août
Pluie en mm	21,0	30,1	11,1	0	47,6	17,8	33,2
Température moy. en °C	17,1	14,5	16,0	19,1	20,6	20,5	18,8

Au moment des mesures, les panicules de Maïs sont tous bien sortis. L'indice foliaire est alors environ égal à 3.

Le déficit de saturation en eau des feuilles est mesuré selon la méthode décrite par ČATSKÝ

(1965 *a*). Les disques foliaires ont 8 mm de diamètre. Chaque disque est saturé individuellement (c'est nécessaire pour le Maïs), en le plaçant dans un trou percé dans une feuille en mousse de polyuréthane imbibée d'eau. Rappelons que le déficit de saturation est défini par la relation suivante pour un échantillon de disques :

$$\text{déficit de saturation} = \frac{\text{Poids à saturation — poids au prélèvement}}{\text{Poids à saturation — poids sec}} \times 100$$

TABLEAU 2

Pluviométrie et température moyenne durant l'été 1970 à « La Minière »

Le déficit théorique cumulé est égal à 85 mm le 12 juin et à 128 mm le 20 août

	11-20 juin	21-30 juin	1-10 juillet	11-20 juill.	21-31 juill.	1-10 août	11-20 août
Pluie en mm	43,0	28,7	17,8	10,1	13,2	29,0	41,3
Température moy. en °C	17,8	17,1	16,5	15,5	17,2	19,9	16,0

On tient compte en outre de la croissance des feuilles pendant la mesure (ČATSKÝ, 1965*a*) et de la température (MILLAR, 1966 et ČATSKÝ, 1969).

La résistance stomatique est déterminée à l'aide d'une chambre de transpiration (VAN BAVEL *et al.*, 1965 ; DJAVANCHIR, 1970).

II. — RÉSULTATS

2. 1. — *Variation diurne du déficit de saturation en eau des feuilles*

Les résultats obtenus le 28 juillet 1969 sur Maïs irrigué sont indiqués à titre d'exemple sur la figure 1.

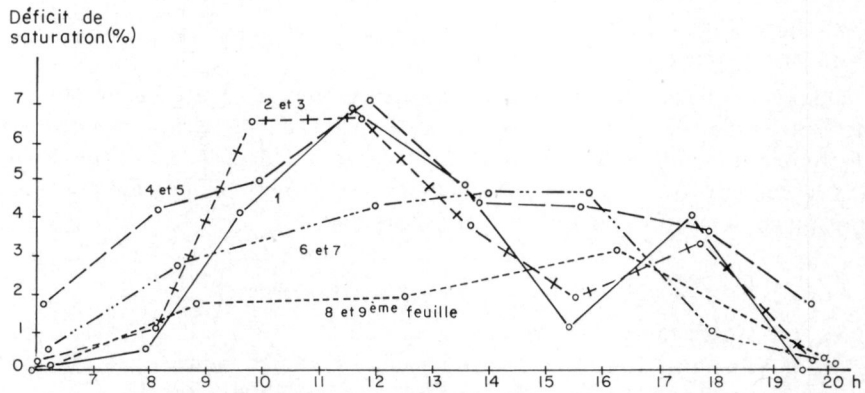


FIG. 1. — *Variation du déficit de saturation en eau des feuilles de Maïs au cours de la journée*

Les feuilles sont numérotées à partir du sommet
Chaque point est la moyenne de 12 prélèvements

On notera que le maximum de déficit est atteint plus tôt en fin de matinée pour les feuilles supérieures. En outre, une réhydratation des feuilles supérieures a lieu entre midi et 14 heures et un nouveau maximum de déficit se fait sentir vers 17 heures. Pour d'autres journées où la sécheresse est plus faible, les deux pics de la courbe obtenue pour les feuilles supérieures s'estompent.

Vers midi, au moment où le déficit de saturation de l'ensemble du feuillage est maximal, il correspond, dans le cas de la figure 1, à environ 0,03 mm (0,03 litre par m²). Cette quantité représente à peu près le $\frac{1}{100}$ de l'évapotranspiration quotidienne (3 mm). Le flux est ainsi pratiquement conservatif au niveau des feuilles.

Ces déficits sont plus faibles que ceux obtenus avec d'autres cultures. Une comparaison avec quelques plants de chou fourrager (*Brassica oleracea* L., var. *medullosa thell.*) élevés en plein champ, dans les mêmes conditions que le maïs, montre qu'en culture sèche le déficit atteint par belle journée d'été, vers midi, des valeurs 2 à 3 fois plus élevées que pour le Maïs.

La courbe diurne du déficit de saturation en eau des feuilles de Maïs sec est sensiblement identique à celle du Maïs irrigué. Durant les heures les plus chaudes, le déficit de saturation du Maïs sec ne dépasse pas celui du Maïs irrigué de plus de 1 ou 2 p. 100.

2. 2. — *Résistance stomatique des feuilles d'une culture de Maïs* in situ (1).

L'ouverture des stomates est très différente d'une feuille à l'autre dans la culture en raison des différences d'éclairement (feuilles à l'ombre, feuilles plus ou moins ensoleillées). L'ouverture des stomates est également variable entre la face supérieure et la face inférieure d'une même feuille (fig. 2). Pour caractériser globalement la résistance d'une feuille, on peut définir une résistance stomatique équivalente telle que (en fait la résistance r_s rend aussi compte de la perméabilité de la cuticule à la vapeur d'eau) :

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_{ss}} + \frac{1}{r_{si}}$$

où r_s est la résistance stomatique équivalente ($m^{-1}s$),
r_{ss} la résistance de la face supérieure,
r_{si} la résistance de la face inférieure.

On notera que la résistance stomatique équivalente n'est pas une grandeur directement utilisable pour calculer les échanges de vapeur d'eau ; elle permet simplement de regrouper les mesures de résistances des faces supérieures et inférieures (RASCHKE, 1958 ; MORESHET *et al.*, 1968 ; de PARCEVAUX, 1972). On relie en effet transpiration et résistances à la diffusion de la vapeur d'eau par

$$\frac{1}{r_a + r_s} = \frac{1}{r_{as} + r_{ss}} + \frac{1}{r_{ai} + r_{si}}$$

où r_a est la résistance de l'air (couche limite)
r_{as} la résistance de l'air correspondant à la face supérieure
r_{ai} la résistance de l'air correspondant à la face inférieure.

(1) Ce paragraphe rassemble des résultats ayant fait l'objet d'une thèse de docteur ingénieur soutenue par A. DJAVANCHIR en 1971.

On remarque (fig. 2) que :

— les stomates sont généralement plus ouverts le matin que l'après-midi vraisemblablement pour des raisons hydriques ; LEMON *et al* (1971) trouvent un résultat identique ;

— les stomates de la face inférieure sont plus ouverts que ceux de la face supérieure.

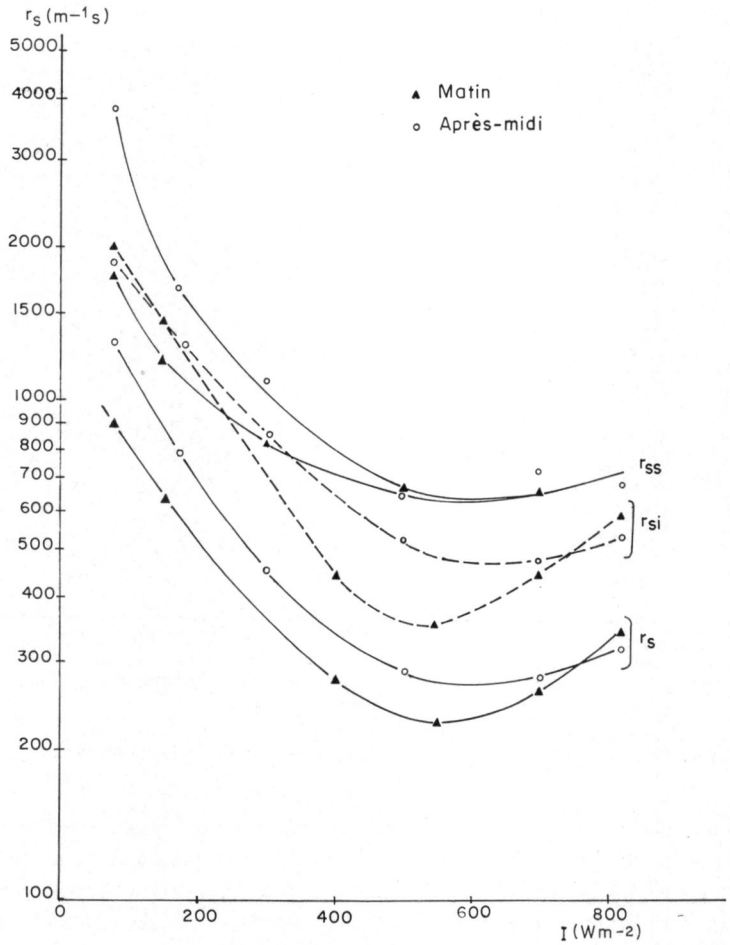


FIG. 2. — *Influence du rayonnement solaire incident sur la résistance stomatique des deux faces d'une feuille de maïs en place*

En ordonnées : résistance stomatique de la face supérieure r_{ss}, de la face inférieure r_{si} ou équivalente r_s, le matin et l'après-midi. La Minière (Yvelines) 22-23 juillet 1970.

Les résultats présentés figure 2 sont relatifs à la partie médiane de la 3e, 4e ou 5e feuille du Maïs irrigué.

Par ailleurs, l'éclairement porté en abscisses (fig. 2) doit être mesuré sur un plan parallèle à la feuille, au voisinage de cette dernière et dans les mêmes conditions d'éclairement. Sinon les points obtenus ne font pas apparaître nettement la régula-

tion photique. C'est le cas figure 3, où l'on a indiqué toutes les mesures de résistance stomatique r_s de la figure 2 en portant en abscisses la valeur de l'éclairement mesuré horizontalement, au sommet de la végétation, au moment de la mesure.

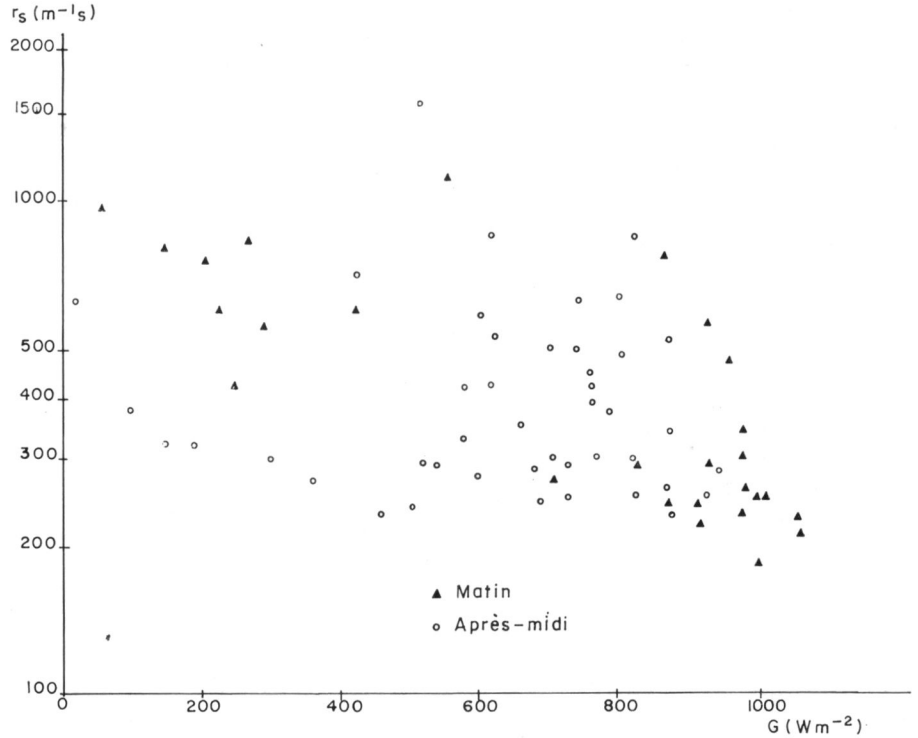


FIG. 3. — *Influence du rayonnement solaire* (G) *sur la résistance stomatique de feuilles de Maïs en place*

En ordonnées : résistance stomatique r_s
En abscisses : rayonnement G mesuré horizontalement au sommet de la végétation.

En outre, pour être certain que les stomates ne sont pas en train de s'ouvrir ou de se fermer pour des raisons photiques, on vérifie que, pendant 15 minutes environ avant une mesure, l'éclairement varie peu. Au préalable, plusieurs expériences avaient été faites pour mesurer le temps nécessaire à l'ouverture et à la fermeture photique ; on avait obtenu 14 minutes en moyenne pour la fermeture (passage de la lumière à l'ombre) et 12 minutes pour l'ouverture.

On remarque (fig. 2) que dans le cas du Maïs, les stomates s'ouvrent encore à la lumière pour des éclairements élevés. L'ouverture photique se fait encore sentir jusqu'à 500 Wm^{-2}, soit environ 50 000 lux avec le rayonnement solaire.

Enfin les feuilles d'âge différent (numéro d'ordre croissant à partir du sommet) ne réagissent pas de la même manière (fig. 4). Les parties éclairées des 3e, 4e et 5e feuilles ont les plus faibles valeurs de résistances durant l'après-midi.

Dans le cas du Maïs sec, les résistances stomatiques sont plus élevées l'après-midi que dans celui du Maïs irrigué, à éclairement égal (fig. 5).

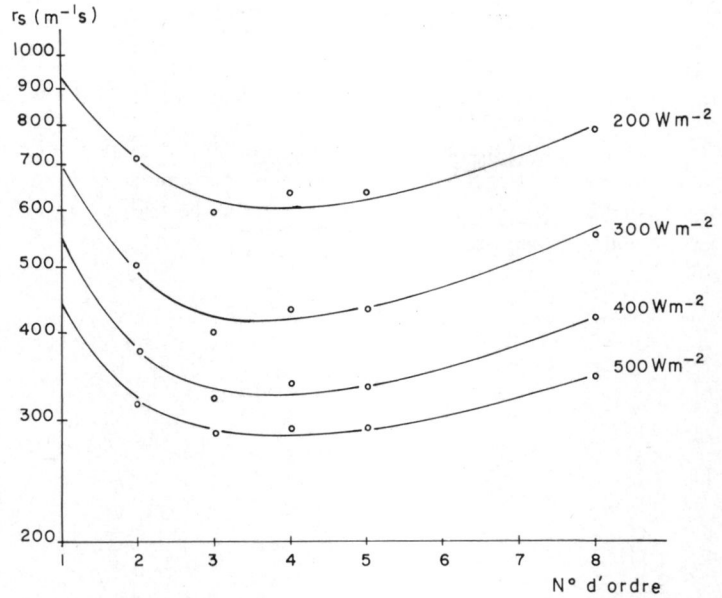


FIG. 4. — *Variation de la résistance stomatique en fonction du numéro d'ordre des feuilles, compte tenu de l'éclairement I*

On a retenu uniquement les valeurs mesurées l'après-midi. Le matin, la différence est encore moins importante entre les feuilles. Juillet-août 1970

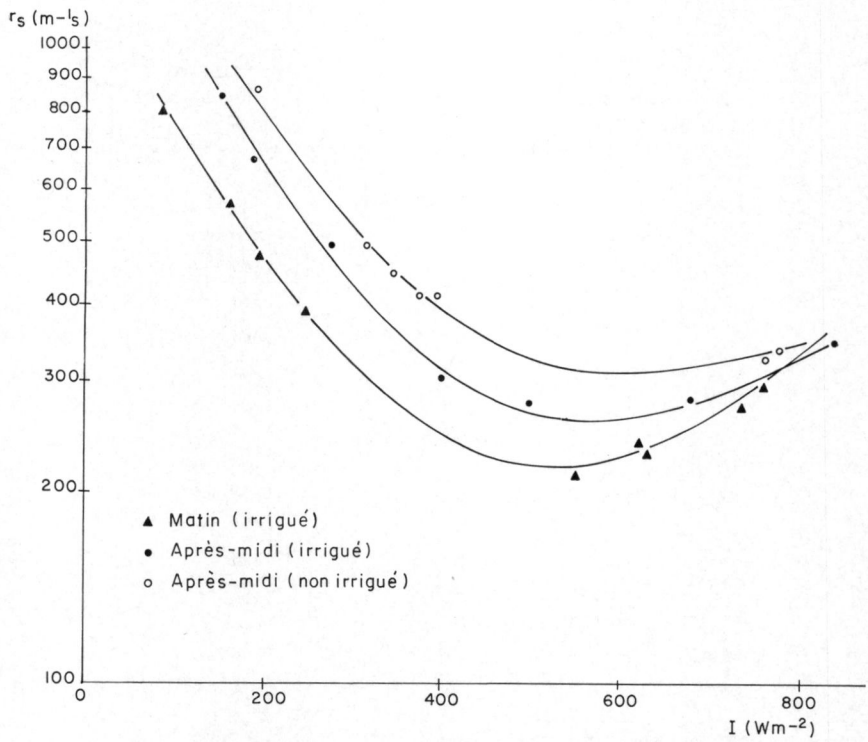


FIG. 5. — *Variation de la résistance stomatique des feuilles de maïs en fonction de l'éclairement I. Comparaison entre une culture sèche et une culture irriguée*

L'éclairement I est mesuré parallèlement à la feuille. Juillet 1970

2. 3. — *Influence de l'irrigation sur le développement du feuillage*

Au début août, la surface de chacune des feuilles est plus grande pour le Maïs irrigué que pour le Maïs sec (fig. 6). Le poids frais et le poids sec des feuilles de Maïs irrigué sont également plus élevés que ceux du Maïs sec (fig. 7). Les teneurs en eau par contre sont, elles, à peu près égales.

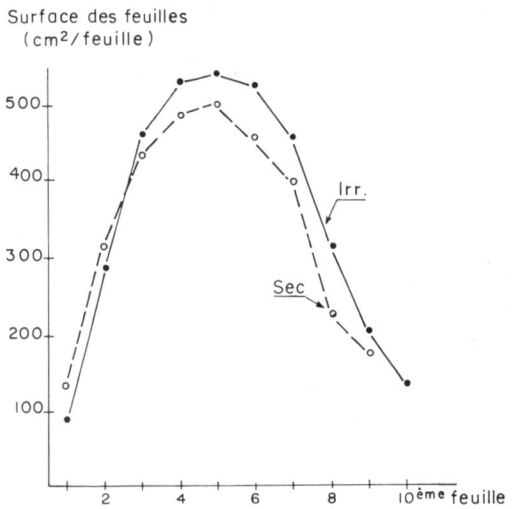


FIG. 6. — *Comparaison des surfaces des feuilles de Maïs d'ordre différent*
Les feuilles sont numérotées à partir du sommet
Hybride I. N. R. A. (F7 × Ep 1) après l'épiaison. 1er août 1969.

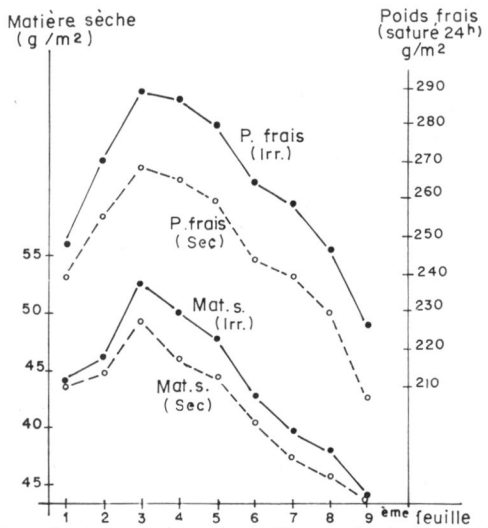


FIG. 7. — *Comparaison des poids frais et des poids secs des feuilles de Maïs d'ordre différent*
Voir les indications de la légende de la figure 6

Un peu plus tard dans la saison (13 août 1969), l'indice foliaire du Maïs est de 2,9 pour le Maïs irrigué et de 2,65 pour le Maïs sec. En outre, on voit sur les profils de surface foliaire (fig. 8) que les feuilles du Maïs sec, notamment les 3e, 4e et 5e feuilles

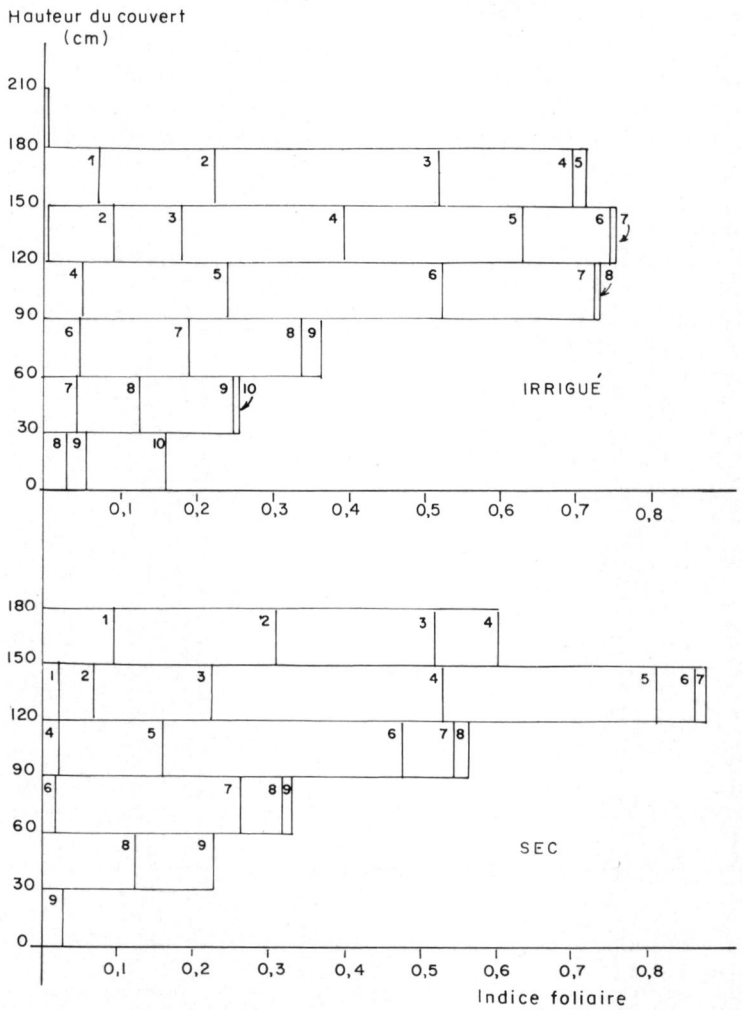


FIG. 8. — *Comparaison des profils d'indice foliaire du Maïs sec et du Maïs irrigué*
La contribution des feuilles d'ordre différent, numérotées à partir du sommet, est indiquée sur la figure. 13 août 1969

depuis le sommet, sont plus concentrées dans la zone 120 à 150 cm que celle du Maïs irrigué. Le rendement en grain du maïs irrigué fut égal à 108 quintaux par hectare en 1969 contre 93 pour le maïs non irrigué (86,4 et 84,6 respectivement en 1970).

L'influence de l'eau sur la croissance se fait sentir en partie par l'action des conditions hydriques sur l'assimilation nette du CO_2, en partie par leurs actions sur l'alimentation minérale, la translocation des produits élaborés et l'élongation du feuillage. On se limitera ici au premier cas.

2. 4. — *Action de l'eau sur l'assimilation nette d'une feuille de Maïs*

La relation entre l'assimilation nette d'une feuille de Maïs (sous 80 Wm^{-2} de lumière visible, à 28°C et à 270 - 300 v.p.m. de concentration en CO_2) et le déficit de saturation en eau est indiquée figure 9. Les plantes de Maïs (*F7* × *EP 1*) utilisées pour cette expérience ont été cultivées en chambre climatisée à l'Institut de Botanique expérimentale de l'Académie des Sciences de Prague (chambre conditionnée Sherer, Cel 37-14, Marshall. Mich., avec un éclairement égal à 70 Wm^{-2} dans le visible pendant 16 heures, à 25° le jour et 19°C la nuit et une humidité relative égale à 70 p. 100.)

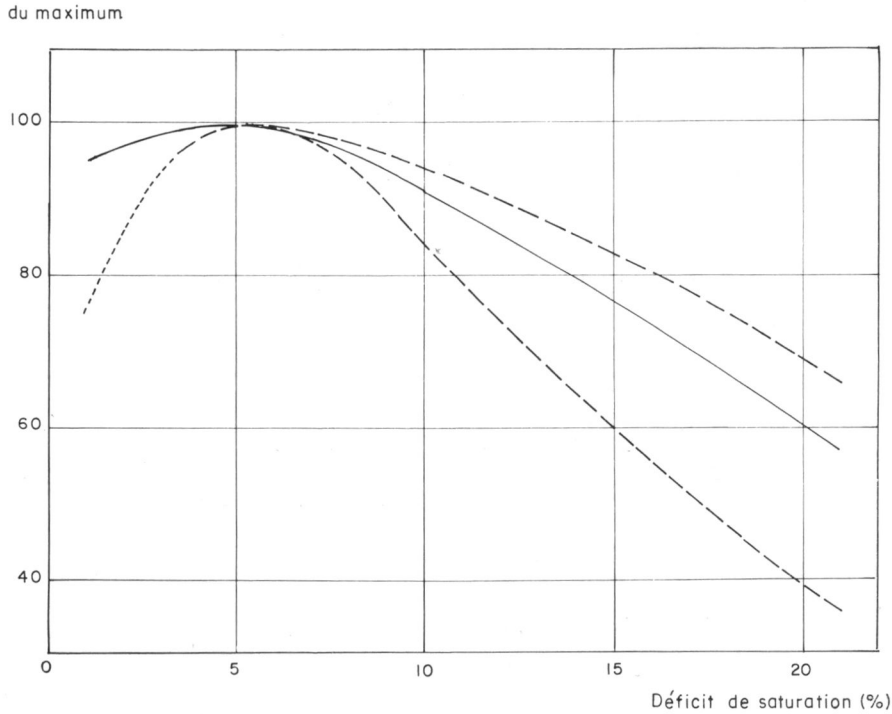


FIG. 9. — *Assimilation nette des feullles de Maïs en fonction du déficit de saturation*

Les conditions de l'expérience sont indiquées dans le texte.
La courbe en traits pleins est une courbe moyenne, les courbes en traits discontinus sont les enveloppes de l'ensemble des points expérimentaux obtenus.
— On a tenu compte en outre des données de la littérature pour tracer ces différents courbes.
— Pour le matériel végétal utilisé, une relation presque linéaire a été trouvée entre le déficit de saturation en eau et le potentiel hydrique ψ entre 2 et 15 p. 100 de déficit (un déficit de saturation égal à 10 p. 100 correspond à — 5,5 bars environ).

La forme des courbes obtenues reliant l'assimilation nette au déficit de saturation dépend d'une part, de tout ce qui influence l'assimilation nette et d'autre part, des conditions hydriques auxquelles la plante est soumise durant les périodes précédant la mesure. En outre, les courbes diffèrent si l'on se place lors de l'expérience en régime permanent, en phase de dessèchement ou de réhumectation. De ces faits, il résulte que les points expérimentaux obtenus ne s'ajustent pas sur des courbes bien définies.

Aussi, seules les courbes enveloppes de l'ensemble des points ont été indiquées figure 9. On a vérifié que ces résultats étaient en rapport avec ceux fournis par la littérature à propos du Maïs.

III. — DISCUSSION

3. 1. — *Relation entre la résistance stomatique et le déficit en eau des feuilles*

On a rapproché (fig. 10) les données suivantes :

— la variation du déficit de saturation des feuilles de Maïs irrigué (1re à 5e feuille en partant du sommet) au cours de la journée ;

— la variation de la résistance stomatique des parties ensoleillées de ces mêmes feuilles au cours de la journée.

Bien que dans le cas du Maïs irrigué, le déficit de saturation maximal soit faible, on note néanmoins que l'après-midi, à un même déficit hydrique, il correspond une résistance stomatique plus élevée que le matin (fig. 11), bien que les éclairements ne diffèrent pas sensiblement, par belle journée, de part et d'autre du midi vrai.

A partir de midi, on observe une légère fermeture des stomates alors que la feuille se réhydrate (fig. 10). Cette fermeture peut être due à plusieurs phénomènes :

— un déséquilibre dans l'alimentation en eau de la feuille (STALFELT, 1955 ; de PARCEVAUX, 1963) ;

— une régulation des stomates purement hydropassive l'après-midi bien que le déficit de saturation atteigne des valeurs supérieures à 7 p. 100 (LEMÉE, 1956) ;

— un engorgement des cellules de garde par accumulation des produits photosynthétisés depuis le lever du soleil.

Les mesures faites n'ont pas permis de déterminer la cause exacte de la régulation stomatique dans l'après-midi.

La première hypothèse est la plus fréquemment admise. Si l'on retient cette hypothèse, on peut tirer les conséquences suivantes des résultats indiqués sur la figure 10 pour ce qui concerne la diffusion de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère.

Il semble, au vu de ces résultats, que le déterminisme hydrique de la fermeture des stomates, l'après-midi, dans le cas favorable d'un maïs irrigué, ne s'explique pas par l'état d'hydratation moyen de la feuille au moment de la mesure. Ce dernier traduit un déséquilibre entre l'évaporation au niveau de la feuille (demande) et l'absorption au niveau des racines (offre). Or, il résulte des résultats indiqués sur la figure 10 B que, l'après-midi, l'absorption est supérieure à la transpiration. En outre, la notion de potentiel efficace (HALLAIRE, 1964) ne semble pas permettre d'expliquer cette fermeture des stomates puisque (fig. 10) la fermeture a lieu lorsque la feuille se réhydrate. Il faut donc modifier l'interprétation de la fermeture des stomates par l'équilibre offre / demande en tenant compte d'un effet analogue à un effet d'hystérésis qui apparaît nettement sur la figure 11 : la résistance stomatique atteint la même valeur pour un déficit de saturation en eau beaucoup plus grand en phase

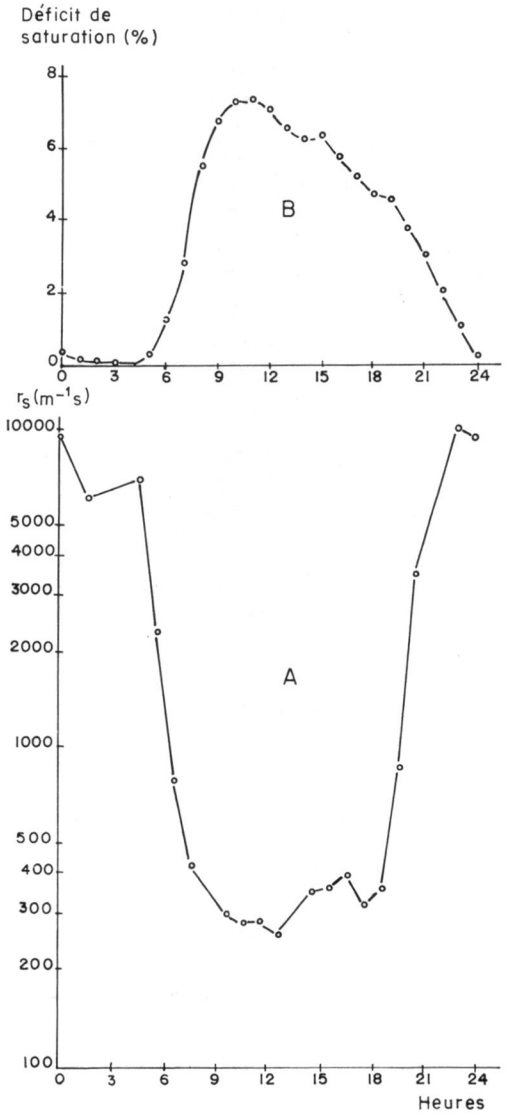


FIG. 10. — *Variation au cours de la journée de la résistance stomatique et du déficit de saturation des feuilles de maïs*

Courbe A : en ordonnées : la résistance stomatique équivalente.
en abscisses : les heures du jour.
Courbe B : en ordonnées : le déficit de saturation des feuilles.
en abscisses : les heures du jour. Juillet 1970.

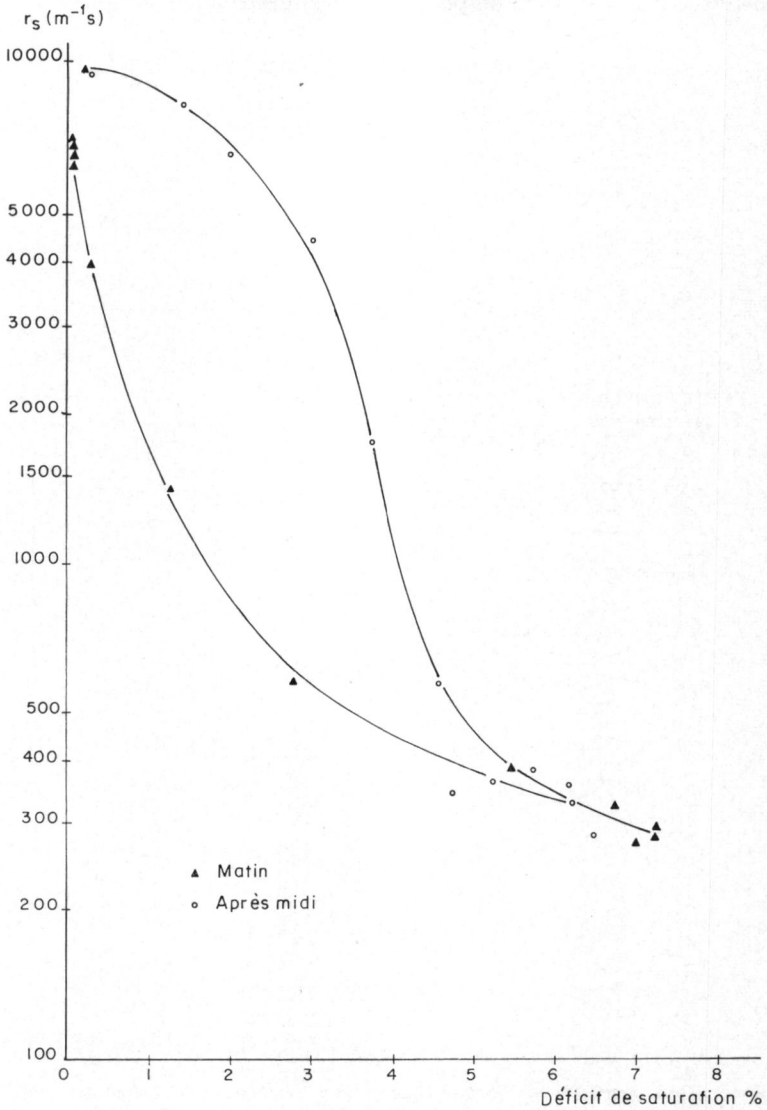


FIG. 11. — *Variation de la résistance stomatique de feuilles de Maïs en place en fonction du déficit de saturation*

En ordonnées : la résistance stomatique équivalente
En abscisses : le déficit de saturation. Juillet 1970

de réhydratation (fermeture stomatique de l'après-midi) qu'en phase de déshydratation (ouverture stomatique de la matinée). On propose (fig. 12) un schéma expliquant le phénomène observé (CRUIZIAT, 1971). On considère dans la feuille, d'une part l'ensemble des cellules du mésophylle, d'autre part, les cellules de garde qui sont relativement isolées (peu de plasmodesmes) des cellules voisines.

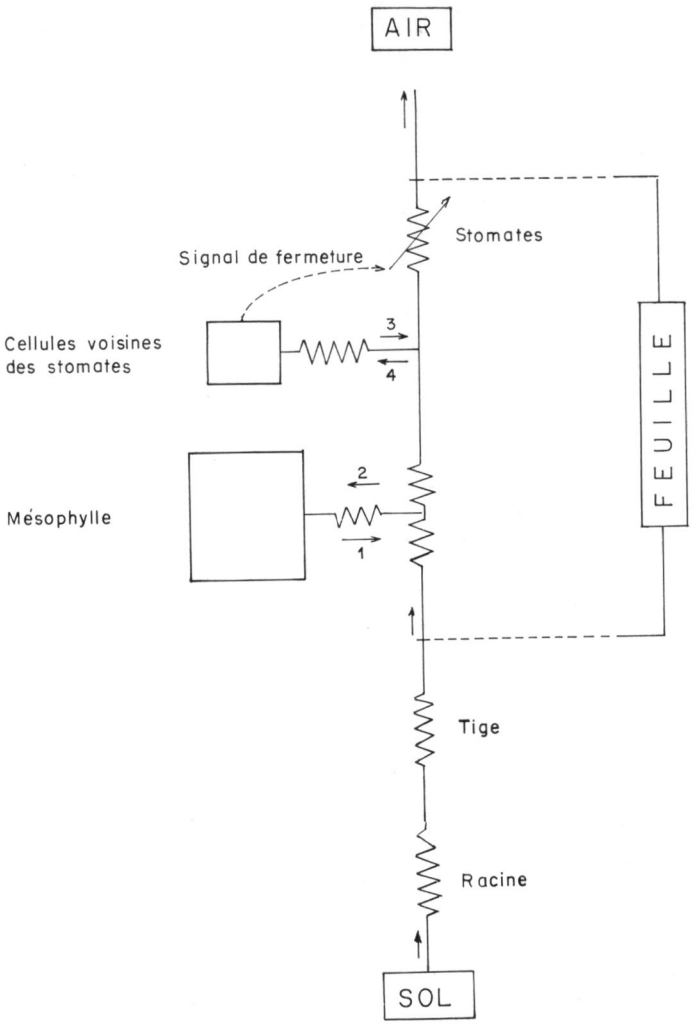


FIG. 12. — *Schéma hypothétique de la circulation de l'eau dans la plante*

L'eau contenue dans les cellules du mésophylle ne participe pas directement au transfert de l'eau depuis le sol vers l'atmosphère (réservoir latéral au circuit). Certaines cellules voisines des stomates jouent le rôle d'un organe de commande de fermeture des stomates pour des raisons hydriques. Si les transferts selon 1, 2 se font plus facilement que selon 3, 4, on peut expliquer ainsi le cycle d'hystérésis (fig. 11)

Les obstacles au mouvement d'eau liquide entre les cheminements privilégiés de l'eau issue des vaisseaux et les cellules voisines des stomates seraient importants. Autrement dit, la résistance à la diffusion de l'eau liquide correspondant à la voie

3-4 de la figure 12 serait élevée, alors que la résistance à la diffusion de l'eau liquide entre les cellules du mésophylle et les cheminements privilégiés (voie 1-2 de la figure 12) serait plus faible que la précédente.

Le matin, les stomates s'ouvrent pour des raisons photiques, la feuille se déshydrate progressivement : les parois cellulosiques puis les cellules du mésophylle se déshydratent plus vite que les cellules de commande de l'ouverture stomatique. On voit sur la figure 10 que la fermeture stomatique commence vers 13 heures. La réhydratation des parois cellulosiques et des cellules du mésophylle est alors plus rapide que celle des cellules de commande ; jusqu'à 17 heures, les stomates restent fermés. Après 17 heures, ils s'ouvrent à nouveau, puis se referment en raison de la tombée du jour. On peut donc supposer que ce retard dans la réhydratation des cellules de commande de l'ouverture stomatique (4 : fig. 12) par rapport à la réhydratation du reste de la feuille (2 : fig. 12) peut expliquer le phénomène d'hystérésis.

Il en serait de même pour les processus de déshydratation (1 et 3 : fig. 12).

En conclusion, la relation entre le déficit de saturation des feuilles et la résistance stomatique n'est pas directe. Il faut faire intervenir les conditions d'alimentation en eau des périodes précédant la mesure et sans doute les conditions d'accumulation des produits photosynthétisés. On va voir maintenant les conséquences de ce résultat sur l'effet de l'alimentation en eau sur l'assimilation du CO_2 par la feuille.

3. 2. — *Action de l'eau sur l'assimilation nette d'une feuille de Maïs*

Le Maïs appartient aux plantes dont le cycle de fixation du CO_2 est du type C_4 (voir la revue bibliographique de HATCH et SLACK, 1970). Ce type de plante semble moins sensible à la sécheresse que les espèces dont le cycle de fixation du CO_2 est le cycle de CALVIN (LAETSCH, 1968). L'action du déficit en eau sur l'assimilation nette d'une feuille de Maïs (fig. 9) conduit pourtant à des courbes dont l'allure est voisine de celles obtenues pour d'autres espèces (BRIX, 1962).

Aux déficits de saturation voisins de zéro, on observe une légère réduction de l'assimilation nette (fig. 9). Cette réduction est généralement attribuée à une fermeture hydropassive des stomates (BRIX, 1962 ; SLATYER, 1970 *b*). Au bout d'une période assez longue de saturation en eau, la réduction de l'assimilation nette peut devenir considérable (ČATSKÝ, 1965 *b*). Cette réduction est en relation avec la diminution de porosité de la feuille telle qu'on la mesure avec un poromètre à flux visqueux (SOLAROVA, 1965). Cette réduction de l'assimilation nette aussi bien que de la porosité de la feuille s'explique par la fermeture hydropassive des stomates et probablement aussi par l'obstacle opposé à la diffusion des gaz par les méats remplis d'eau à la suite de cette saturation prolongée. Dans les conditions naturelles, ces faibles déficits peuvent s'observer au lever et au coucher du soleil (fig. 1).

Pour les déficits compris entre 2 et 10 p. 100, l'assimilation nette est voisine de l'optimum d'après la figure 9 (voir aussi BOYER, 1970). On notera que dans les conditions de culture, les feuilles de maïs sont le plus souvent dans cette gamme (fig. 1). Ce résultat doit être tempéré par ce qui a été dit précédemment sur les relations entre le déficit en eau et la résistance stomatique. En effet, à un même déficit (compris entre 2 et 10 p. 100) correspondent des résistances stomatiques plus impor-

tantes l'après-midi que le matin. Une réduction de l'assimilation est alors d'autant plus probable que les feuilles de maïs ont une assimilation nette qui dépend beaucoup de la résistance stomatique sous éclairement élevé (GIFFORD, 1971 ; CHARTIER, 1971).

Enfin, au-delà de 10 p. 100 de déficit en saturation, la réduction de l'assimilation nette est due à la fois à une fermeture des stomates, et à une modification des mécanismes intracellulaires de photosynthèse et de photorespiration. En effet, si l'on suppose que la lumière est saturante, l'expression de l'assimilation nette (LAKE, 1967 ; CHARTIER, 1971) peut s'écrire :

$$F = \frac{C - \gamma}{r_a + r_s + r_i}$$

où F est l'assimilation nette de la feuille,
C la concentration en CO_2 dans l'air,
γ le point de compensation pour le gaz carbonique (concentration en CO_2 de l'air pour laquelle l'assimilation nette est nulle sous lumière saturante),
r_a la résistance à la diffusion du CO_2 dans l'air,
r_s la résistance stomatique,
r_i la résistance intracellulaire (résistance à la diffusion du CO_2 en phase liquide r_m et résistance à la carboxylation r_x).

Si le déficit de saturation croît, r_s croît, donc F décroît. Par ailleurs, si le déficit de saturation dépasse 10 à 12 p. 100, le point de compensation pour le CO_2, qui était voisin de zéro v.p.m. croît très rapidement avec le déficit de saturation des feuilles de maïs (GLINKA et KATCHANSKY, 1970). Il en résulte que l'assimilation nette F va décroître également très rapidement.

En conclusion, on notera que dans les régions tempérées relativement humides, pour le Maïs, la résistance stomatique risque d'être la cause essentielle de réduction de l'assimilation nette.

Par contre, en région plus sèche, dès lors que le déficit de saturation dépasse 10 à 15 p. 100, les blocages intracellulaires des mécanismes de fixation du CO_2 tels qu'ils sont traduits par la variation du point de compensation pour le CO_2 peuvent devenir importants (SLATYER, 1970 *b*).

Reçu pour publication en octobre 1972.

SUMMARY

NET ASSIMILATION, WATER USE AND MICROCLIMATOLOGY OF A MAIZE CANOPY.
IV. - DIURNAL COURSES OF STOMACAL RESISTANCES
AND WATER SATURATION DEFICIT OF LEAVES ; EFFECTS UPON NET ASSIMILATION

Experimental data are given for leaves of a maize canopy on :
— diurnal course of water saturation deficit,
— stomatal resistances as influenced by irradiance, leaf order and time of the day,
— comparisons of leaf characteristics (area, dry and fresh weights) in irrigated and non irrigated maize,
— net assimilation as influenced by water saturation deficit.

In the afternoon the stomatal resistances are higher than in the morning for the same irradiance (fig. 2) and the same water saturation deficit of the leaves (fig. 11).

The above results are discussed in term of water diffusion in the soil plant atmosphere continuum in one hand, effects upon CO_2 net exchange of leaves in the other hand.

ZUSAMMENFASSUNG

NETTOASSIMILATION,
VERWENDUNG VON WASSER UND MIKROKLIMA EINES MAISFELDES.
IV. - TAGESEVOLUTION DES PORENWIDERSTANDES
UND DES MANGELS AN BLATTSATURATION ;
KONSEQUENZEN NACH DER FIXIERUNG DES CO_2

Die tägliche Variation des Mangels an Wassersättigung und des Porenwiderstandes der verschiedenen Blätter einer Maiskultur wurden gemessen. Die Wirkung des Lichtes auf die Öffnung der Poren ist deutlich nachgewiesen (Abb. 2). — Eine gewisse Dissoziation zwischen dem Öffnungsgrad der Poren und dem Wassergehalt der Blätter zeichnet sich deutlich ab. Den ganzen Tag hindurch äussert sich das durch ein Hysteresisphänomen, wenn man den Porenwiderstand je nach dem Sättigungsmangel graphisch darstellt (Abb. 11).

Die Beziehung zwischen dem Wassermangel, dem Porenwiderstand und der Fixierung des CO_2 durch das Blatt, sowie einige Folgen der Bewässerung des Mais auf der Blattoberfläche, das Trocken- und das Frischgewicht der Blätter wurden ebenfalls untersucht.

РЕЗЮМЕ

Чистая ассимиляция, использование влаги и микроклимат кукурузного-поля. Дневная эволюция устойчивости устьиц и дефицита насыщенности листьев. Последствия в отношении фиксации CO_2.

Я. ЧАТСКИ, П. ШАРТЬЕ, А. ДЖАВАНШИР.

Измерялись дневные изменения дефицита насыщенности влагой и устойчивости устьиц разных листьев культуры кукурузы и было четко выявлено влияние света на открытие устьиц (рис. 2). Наблюдалась также некоторая диссоциация между степенью открытия устьиц и содержанием влаги в листьях. Если перенести на диаграмму устойчивость устьиц, в зависимости от насыщенности (рис. 11) — это выражается явлением «гистерезиса».

Изучались также корреляция между водным дефицитом, устойчивостью устьиц и фиксацией CO_2 листом, а также и некоторые последствия орошения кукурузы, в отношении изменений листовой площади, сухого веса и веса зеленого листа.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brix H., 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. *Physiol. Plant.*, **15**, 10-20.

Boyer J. S., 1970. Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiol.*, **45**, 236-239.

ČATSKY J., 1965 *a*. Leaf-disc method for determining water saturation deficit. In : Eckardt F. E. (éd.) : *Methodology of Plant Eco-Physiology. Proc. Montpellier Symp.* 1962, 353-360, Unesco, Paris, 1965.

ČATSKÝ J., 1965 *b*. Water saturation deficit and photosynthetic rate as related to leaf age in the wilting plant. In : Slavik B. (éd.). *Water Stress in Plants*, 203-209. Publ. House Czech. Acad. Sci. Prague and Dr W. JUNK, Publ. The Hague, 1965.

ČATSKÝ J., 1969. Temperature effects in the measurement of water saturation deficit (relative water content) in tobacco and kale. *Biol. Plant.*, **11**, 381-383.

CHARTIER P., 1971. Net assimilation of plants as influenced by light and carbon dioxide. In : Rees A. R., Cockshull K. E., Hand D. W., Hurd R. G. (Ed.). *Crop Processes in Controlled Environments*. Academic Press, London and New York, 203-216.

CLAASSEN M. M., SHAW R. H., 1970. Water deficit effects on corn. I. Vegetative components. II. Grain components. *Agron. J.*, **62**, 649-652, 652-655.

CRAFTS A. S., 1968. Water deficits and physiological processes. In : Kozlowski T. T. (éd.) : *Water Deficits and Plant Growth*. Vol. 2. *Plant Water Consumption and Response*. 85-133, Acad. Press, New York-London, 1968.

CRUIZIAT P., 1971. *Contribution à l'étude des réserves en eau de la plante*. Thèse de Doctorat de 3e cycle. Faculté des Sciences de Paris, 82 p.

DJAVANCHIR A., 1970. Mise au point d'une chambre de transpiration pour mesurer la résistance stomatique. *Œcol. Plant.*, **5**, 301-318.

DJAVANCHIR A., 1971. *Mise au point d'une chambre de transpiration et son application à l'étude de la régulation stomatique*. Thèse Ingénieur Docteur, Université de Paris-sud, Faculté d'Orsay, juin 1971.

GATES C. T., 1968. Water deficits and growth of herbaceous plants. In : Kozlowski T. T. (éd.) : *Water Deficits and Plant Growth*. vol. 2. *Plant Water Consumption and Response*. 135-190. Acad. Press. New York-London, 1968.

GIFFORD R. M., 1971. The light response of CO_2 exchange : on the source of differences between C_3 and C_4 species. In Hatch M. D., Osmond C. B. et Slatyer R. O., éd. *Photosynthesis and Photorespiration*. Wiley Interscience, New York, 51-56.

GLINKA Z., KATCHANSKY M. Y., 1970. The effect of water potential on the CO_2 compensation point of maize and sunflower leaf tissue. *Israel J. Bot.*, **19**, 533-541.

HALLAIRE M., 1964. L'eau et la production végétale. *Bull. Tech. Inform.*, **189**, 319-344.

HATCH M. D., SLACK C. R., 1970. Photosynthetic CO_2. Fixation pathways. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, **21**, 141-162.

KRAMER P. J., 1969. *Plant and soil water relationships : A modern synthesis*. McGraw-Hill Book Co., New York etc., 1969.

LAETSCH W. M., 1968. Chloroplast specialization in dicotyledons possessing the C_4-dicarboxylic acid pathway of photosynthetic CO_2 fixation. *Amer. J. Bot.*, **55**, 875-883.

LAKE J. V., 1967. Respiration of leaves during photosynthesis II. Effects on the estimation of mesophyll resistance. *Austr. J. Biol. Sci.*, **20**, 495-499.

LEMEE G., 1956. Aspects écologiques de la régulation stomatique de la transpiration. *Bull. Soc. Franç. Physiol. Vég.*, **2**, 1, 29-38.

LEMON E., STEWART D. W., SHAWCROFT R. W., 1971. The sun's work in a cornfield. *Science*, **174**, 371-378.

MILLAR B. D., 1966. Relative turgidity of leaves : temperature effects in measurements. *Science*, **154**, 512-513.

MORESHET S., KOLLER D., STANHILL G., 1968. The partitioning of resistances to gaseous diffusion in the leaf epidermis and the boundary layer. *Ann. Bot.*, **32**, 695-701.

PARCEVAUX S. de 1963. Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. In Geslin H. Éd. *L'eau et la production végétale*, I. N. R. A., Paris, 63-150.

PARCEVAUX S. de 1972. *Contribution à l'étude des échanges gazeux au niveau des feuilles : rôle des résistances ou longueurs de diffusion en écophysiologie*. Thèse de Doctorat d'État, Université de Paris-Sud, Faculté des Sciences d'Orsay, 1972.

RASCHKE K., 1958. Über den Einfluss der Diffusions Widerstande auf die Transpiration und die Temperatur eines Blattes. *Flora*, **146**, 546-578.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du Maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. Journées internationales de l'irrigation. In *Compte rendu de l'Association Générale des Producteurs de Maïs*, Pau, France, 69-76.

SHINN J. H., LEMON E. R., 1968. Photosynthesis under field conditions. XI. Soil-Plant-Water relations during drought stress in corn. *Agron. J.*, **60**, 337-343.

SLATYER R. O., 1969. Physiological significance of internal water relations to crop yield. In : Eastin J. D. *et al.* (ed.) : *Physiological Aspects of Crop Yield*. 53-83, *Amer. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Amer.*, Madison, Wisc., 1969.

SLATYER R. O., 1970 *a*. The effect of internal Water status on plant growth, development and yield. *Preprint, Symp. Plant Response to Climatic Factors*. Uppsala, 1970.

SLATYER R. O., 1970 *b*. Effects of short periods of water stress on leaf photosynthesis. *Symp. Plant Response to Climatic Factors*. Uppsala, 1970 (sous presse).

SOLAROVA J., 1965. Stomata reactivity in leaves at different insertion level during wilting. In : Slavik B. (ed.) : *Water Stress in Plants*. 147-154. Publ. House Czech. Acad. Sci., Prague and Dr. W. Junk, Publ., The Hague, 1965.

STALFELT M. G., 1955. The stomata as a hydrophotic regulation of the water deficit of the plant. *Physiol. Plant.*, **8**, 572-593.

VAN BAVEL C. H. M., NAKAYAMA F. S., EHRLER W. L., 1965. Measuring transpiration resistance of leaves. *Plant Physiol.*, **40**, 3, 535-540.

WALTER H., KREEB K., 1970. *Die Hydratation und Hydratur des Protoplasmas der Pflanzen und ihre öko-physiologische Bedeutung*. Springer Verlag, Wien-New York, 1970.

Ann. agron., 1973, **24** (3), 307-338.

EFFETS DE LA SÉCHERESSE SUR LA CROISSANCE ET LA PRODUCTION DU SORGHO GRAIN

A. LANGLET

avec la collaboration technique de Annie ALDHUY*, R. VIARD et L. SOS

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A.,
Chemin de Borde-Rouge, Auzeville,
B. P. 12, 31320 Castanet-Tolosan

RÉSUMÉ

Le comportement du sorgho-grain vis-à-vis de déficits d'alimentation hydrique a été étudié au moyen d'un essai en pots, réalisé sous abri. L'intensité de ces déficits, définie par le rapport entre la transpiration T_i des plantes traitées et la transpiration T_t des plantes témoins, est la même pour tous les traitements : $\frac{T_i}{T_t} = 0{,}5$. Ces déficits ont été appliqués entre différents stades du cycle végétatif du sorgho, dans le but de déterminer les périodes les plus sensibles pour la production de grains et donc de prévoir à quels moments l'irrigation a le plus de chances d'être correctement valorisée.

Malgré des possibilités de compensation très importantes par ramification des tiges principales, la période s'étendant du gonflement au début du stade grain pâteux est la plus sensible. La sécheresse agit soit en diminuant le nombre d'épillets, soit en diminuant le poids de 1 000 grains. Des sécheresses plus précoces peuvent également être nuisibles si elles sont longues (20 jours).

La discussion des résultats fait apparaître pour le sorgho une possibilité d'échelonnement des différenciations des fleurs, qui pourrait être dans certaines conditions, un facteur de résistance à la sécheresse.

Les rapports entre les variations de la transpiration et les variations de la surface foliaire pendant et après les traitements sont également discutés.

INTRODUCTION

La détermination des potentialités de production agricole d'un territoire nécessite, entre autres problèmes, de connaître les relations qui existent entre les facteurs et les conditions de climat et de terrain d'une part, et la production des plantes d'autre part. Des travaux précédents (LANGLET *et al.*, 1969 ; LANGLET, 1971) en

* Stagiaire de fin d'études, E. N. I. T. A. de Dijon, 21 - Quétigny.

ont montré l'intérêt dans les prévisions d'orientations et les niveaux de production que l'on a des chances d'obtenir, ou même pour montrer la validité, ou les risques, d'une technique comme l'irrigation.

Nous avions en particulier observé dans ces travaux que la synthèse de plusieurs expérimentations avait permis de calculer la liaison décroissante existant entre le rendement du maïs et du sorgho, et le déficit hydrique réel subi par ces cultures. Cette observation globale de comportement peut aider à prévoir la production de ces cultures dans une situation caractérisée du point de vue de l'alimentation en eau, mais elle n'analyse pas les causes de la relation rendement-alimentation en eau. En particulier, elle ne met pas en évidence de « périodes critiques » montrant à quels moments une sécheresse diminue le plus la production de grains. La connaissance de ces aspects est importante pour la culture irriguée (détermination des périodes d'arrosages...) mais aussi pour la culture non irriguée puisque la localisation des cultures dans l'espace et l'ensemble des techniques culturales peuvent en dépendre.

A la différence du maïs et du tournesol, étudiés notamment par ROBELIN (1963, 1967), le comportement du sorgho grain vis-à-vis de la sécheresse n'a pas été aussi bien précisé. L'opinion prévaut généralement que cette plante supporte mieux la sécheresse que le maïs, mais inversement la valorisation de l'eau apportée est généralement moins bonne pour le sorgho (COTTE, 1966 ; MARTY, 1971 ; CAVALAN, 1972).

L'étude et l'analyse du comportement du sorgho-grain vis-à-vis de la sécheresse peuvent être abordées avec succès au moyen d'un dispositif de culture en pots, donc en milieu contrôlé. Il est en effet facile dans ces conditions de réaliser, entre les stades de développement voulus, des déficits hydriques de caractéristiques déterminées, les autres facteurs n'étant pas limitants.

L'objet de ce travail sera donc, au moyen d'un tel dispositif, d'observer et de discuter les effets sur la croissance, le développement et la production du sorgho-grain, de déficits d'alimentation en eau appliqués entre certains stades du cycle de la plante. Les réactions à la sécheresse des différents organes seront alors connues, et en particulier les périodes où la production de grains est la plus sensible à un déficit hydrique. Les résultats contribueront également à apprécier les possibilités de réussite de la culture dans telle situation (notamment selon le climat, la réserve en eau du sol...) et à déterminer les moments où les irrigations ont le plus de chance d'être réalisées à bon escient.

MÉTHODES ET TECHNIQUES

A. — *Conditions de culture*

L'essai a été mené en pots sous un abri ventilé en général de façon satisfaisante. Par contre, l'éclairement était diminué d'approximativement 30 p. 100 par rapport à l'extérieur. La paroi des pots était protégée du rayonnement direct, et leur surface recouverte d'un film plastique.

Chaque pot, portant 3 plantes, a reçu 10 kg de terre sèche, limono-argilo-sableuse légèrement calcaire (pH = 8,15), tamisée à 2 mm. La quantité d'eau utile par pot (entre pF 4,2 et pF 2,7) était voisine de 1 570 ml.

La fertilisation a été largement assurée pour couvrir les besoins de la plante en ce qui concerne le potassium et le phosphore. Pour l'azote, apporté partout en 2 fois (1/3 au semis, 2/3 à la fin du tallage), deux séries de pots ont été constituées :

— dose faible (N_1) : 0,8 g N par pot
— dose forte (N_2) : 2,4 g N par pot

TABLEAU I

Caractéristiques des traitements

Traitements et doses d'azote	Alimentation en eau T_i/T_t	Durée (jours)	Date d'application (1971)	Age de la plante (jours)	Caractéristiques des plantes témoins aux dates indiquées	
					Hauteur tige BM en cm (sous l'apex, puis sous la panicule)	Stade de développement
Témoin N_2	1					30-6 : Ébauches des ramifications des panicules visibles. Fin du tallage : point n° 1
Témoin N_1						7-7 : Début de différenciation des épillets Longueur de l'apex : 0,2 cm Hauteur apex au-dessus plateau tallage : 3 cm
1-2 N_2	0,49	10	30-6 au 10-7	30e au 40e	2,3 à 7,5	10-7 : Glumes nettement différenciées Croissance des ramifications Longueur de l'apex : 0,7 cm Hauteur de l'apex : 7,5 cm Montaison : point n° 2
2-3 N_2	0,56	9	10-7 au 19-7	40e au 49e	7,5 à 21,5	
3-4 N_2	0,53	16	19-7 au 4-8	49e au 65e	21,5 à 93	19-7 : Fleurs visibles sur les panicules, toutes les pièces sont différenciées et formées Gonflement : panicules non sorties et gonflant la gaine de la dernière feuille Longueur de la panicule : 19 cm. Point n° 3
4-5 N_2	0,52	19	4-8 au 23-8	65e au 84e	93 à 96	
1-3 N_2 N_1 *	0,48 0,51	19	30-6 au 19-7	30e au 49e	2,3 à 21,5	25 à 27-7 : Épiaison 29-7 à 4-8 : Floraison terminée le 4-8 Étamines desséchées Longueur de la panicule : 24 cm. Point n° 4
2-4 N_2 N_1 *	0,54 0,55	25	10-7 au 4-8	40e au 65e	7,5 à 93	23-8 : Coloration rouge du grain Début grain pâteux. Point n° 5 Longueur de la panicule : 26 cm
3-5 N_2 N_1 *	0,53 0,58	35	19-7 au 23-8	49e au 84e	21,5 à 96	8 novembre : Récolte

* Les traitements N_1 sont définis ici par rapport au témoin N_1.

Les pots étaient disposés sur des chariots mobiles, permutés chaque jour, de façon à assurer un environnement aussi homogène que possible.

B. — *Conduite de l'essai*

Le protocole adopté est celui proposé par ROBELIN en 1971 dans le cadre du Département « Agronomie » pour une étude du comportement des plantes en conditions de sécheresse. Il avait été mis au point sur le tournesol (ROBELIN, 1967), et une méthodologie comparable a été utilisée pour des plants forestiers (BECKER, 1970).

Dans la méthode adoptée, la sécheresse est définie par le rapport entre la transpiration des plantes (T_i) et la transpiration des plantes témoins (T_t), normalement alimentées en eau. Les traitements sont donc caractérisés par le niveau d'alimentation en eau réalisé $\frac{T_i}{T_t}$, égal ici à 0,5.

L'intensité de la sécheresse est définie ainsi : $1 - \frac{T_i}{T_t} = \frac{T_t - T_i}{T_t}$.

Ce rapport de transpiration caractérise mieux une sécheresse qu'un état de l'eau dans le sol, difficile à maintenir constant. En effet, la transpiration représente une intégration de l'ensemble des rapports entre plante-climat-sol, et traduit donc bien la sécheresse subie par les plantes (ROBELIN, 1971).

Réalisation des traitements.

La définition et les caractéristiques des traitements (durée, dates d'application, stades des plantes) sont indiquées au tableau 1. La figure 1 précise la place des traitements les uns par rapport aux autres.

Les arrosages sont effectués, après pesée des pots, dans 3 tubes plastiques perforés, enfoncés dans la terre et disposés de manière à réaliser dans la masse une humidité aussi homogène que possible. Les apports se font de façon que la transpiration mesurée sur les témoins soit inférieure au tiers ou à la moitié de la réserve utile, ce qui a imposé longtemps des arrosages quotidiens.

Les pots témoins sont ramenés à poids constant, compte tenu de l'augmentation de poids du végétal. Les pots devant faire l'objet du traitement, ne sont pas arrosés tant que leur transpiration dépasse la moitié de celle des pots témoins. On apporte ensuite les quantités d'eau nécessaires pour que $\frac{T_i}{T_t} = 0{,}5$. A la fin du traitement, on arrose de façon à ramener les pots au poids des pots témoins. En fait, il a été difficile de maintenir absolument constant le niveau d'alimentation en eau. Mais sur les durées considérées, le rapport $\frac{T_i}{T_t}$ s'est peu écarté de 0,5 (tabl. 1).

Enfin, pour la dernière période des traitements cumulés, afin de différencier les effets de sécheresse des effets de surface foliaire, le traitement simple correspondant, remis en alimentation hydrique normale, est considéré comme témoin. Ainsi par exemple, pour le traitement 1-3 durant la période 2-3, le témoin sera le traitement 1-2 ramené dans les conditions du témoin.

C. — *Le végétal et les contrôles*

Le végétal utilisé était l'hybride simple *INRA 450*. Quinze graines ont été semées par pot pour ne conserver finalement que 3 plantes réparties aux sommets d'un triangle équilatéral. Cela permettait d'avoir des pots aussi homogènes que possible quant à la vigueur des plantes, et d'éviter ainsi une trop grande dispersion des résultats. Ce but n'a pu être toujours atteint, bien que les pots aient été répartis dans les répétitions selon leur vigueur.

Chaque traitement comportait 4 répétitions. De plus, nous disposions pour la série N_2 d'un nombre de pots suffisant pour réaliser des contrôles comparatifs entre plantes témoins et plantes traitées. Au début et à la fin de chaque période de sécheresse, 2 pots témoins étaient récoltés afin d'observer le stade de développement des plantes, de mesurer la croissance de chaque organe, et la surface foliaire (par planimétrie du calque des feuilles). On récoltait également en fin de période 2 pots ayant subi la sécheresse considérée afin d'en observer les effets instantanés.

Deux contrôles d'arrière-action ont également été réalisés pour chaque traitement, correspondant chacun à des prélèvements de pots témoins. Seuls les derniers traitements (3-5 ; 4-5) n'ont pu avoir qu'un seul de ces contrôles.

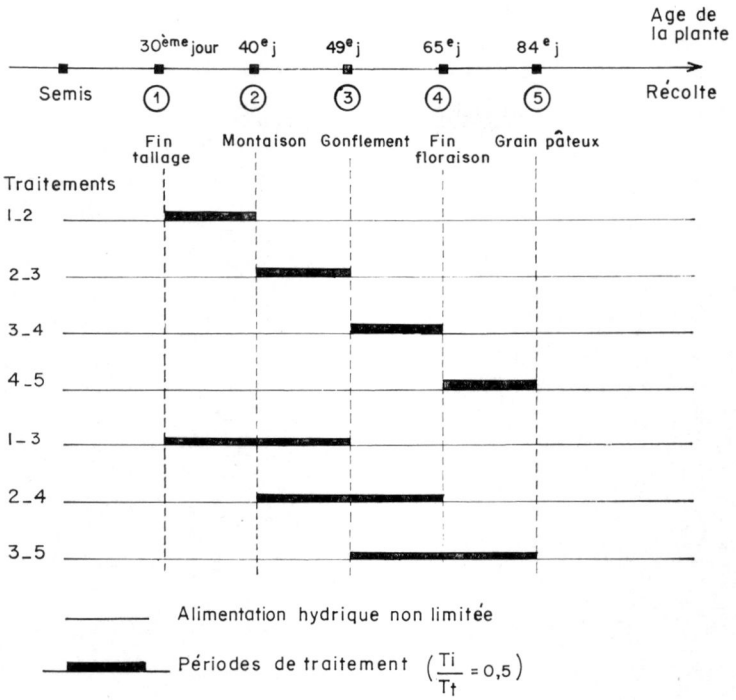


FIG. 1. — *Schéma des traitements*

RÉSULTATS

I. — CONTRÔLES PENDANT LA PÉRIODE DE VÉGÉTATION

A. — *Croissance et développement des plantes*

a) *Courbes de croissance en matière sèche* (fig. 2).

Ces courbes montrent les ralentissements provoqués dans la croissance des principaux organes par rapport à la croissance normale (témoin), selon les dates d'application de la sécheresse et leur localisation dans le cycle.

L'analyse détaillée des observations d'arrière-action des traitements montre que les modifications de croissance des principaux organes (tiges, feuilles, panicules) ne sont pas toujours permanentes et durables. En effet, la croissance des brins maîtres peut reprendre et parvenir à une quantité de matière sèche d'autant plus élevée que les traitements ont été plus précoces et courts. Cette croissance peut, par contre, être plus réduite, ou même arrêtée (3-4) si les sécheresses sont appliquées pendant plus longtemps et à des stades plus proches de la fin floraison (traitements 3-4, 1-3, 2-4, 3-5). Dans ces cas, pour les tiges et feuilles comme pour les panicules, des compensations plus ou moins complètes apparaissent par émission et croissance de talles et surtout de ramifications secondaires de brins maîtres (fig. 3). Les conséquences de ces compensations sur la récolte finale seront examinées plus loin.

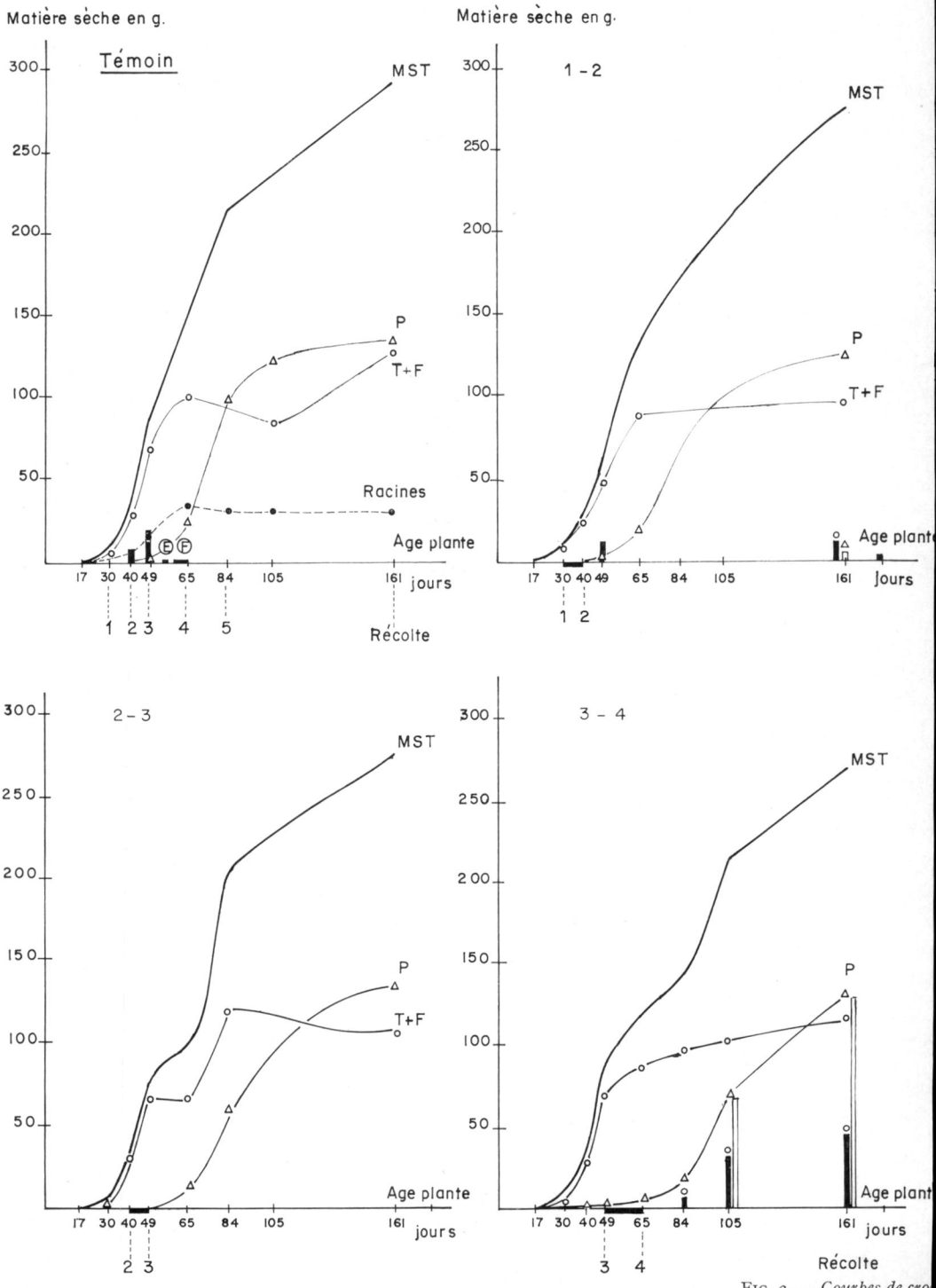
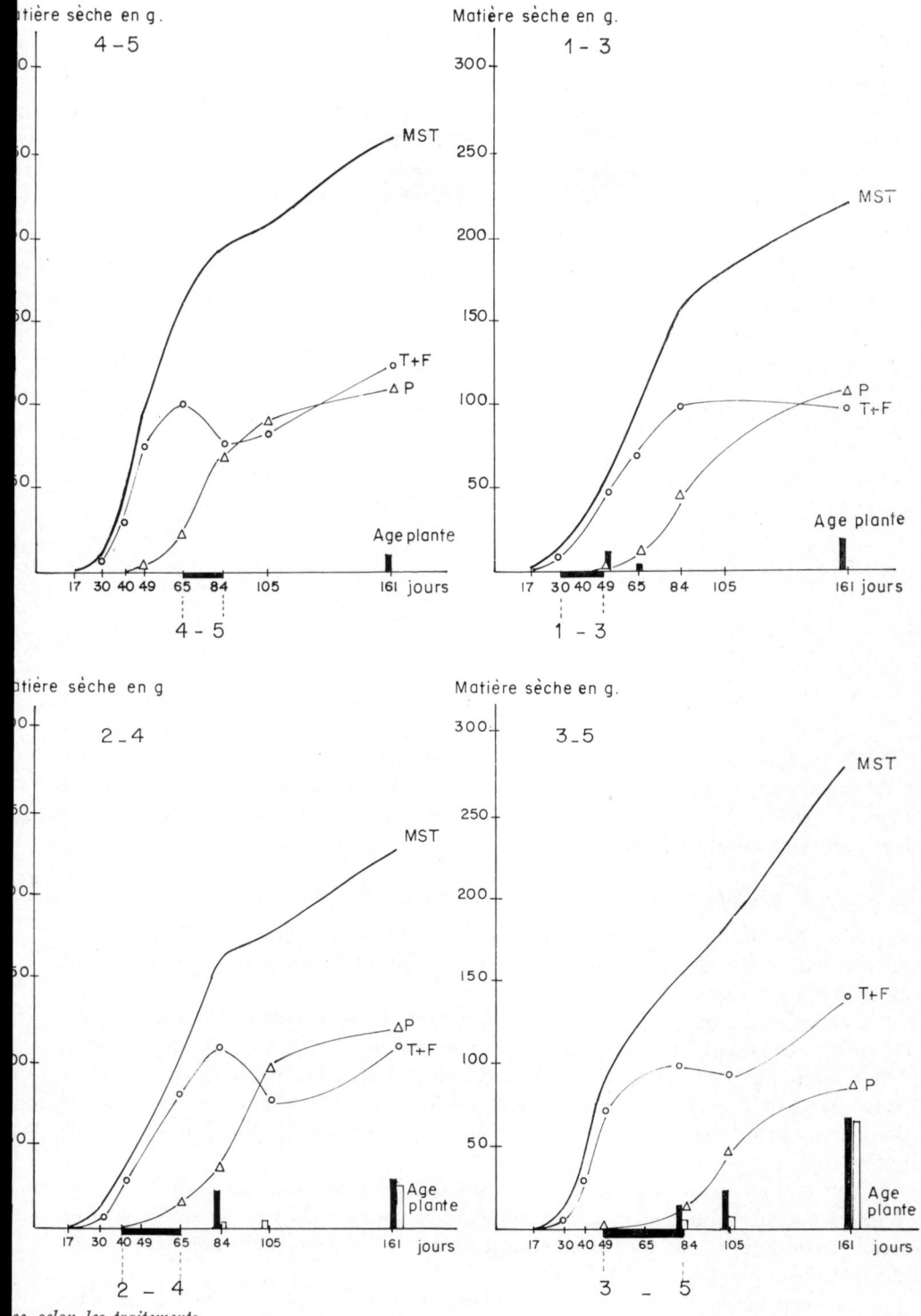


FIG. 2. — *Courbes de cro*



ce selon les traitements

Part des talles et des ramifications dans le total tiges + feuilles

Part des talles et des ramifications dans le total panicules

Si la sécheresse débute lorsque la croissance des organes végétatifs est terminée (après la fin floraison), il ne se produit pas alors ce rattrapage par talles ou ramifications, le traitement 4-5 le montre nettement. Par contre, la croissance des panicules des brins maîtres est diminuée et la matière sèche de ces organes reste toujours inférieure à celle notée pour les plantes témoins, puisque les compensations observées ailleurs ne peuvent se produire ici.

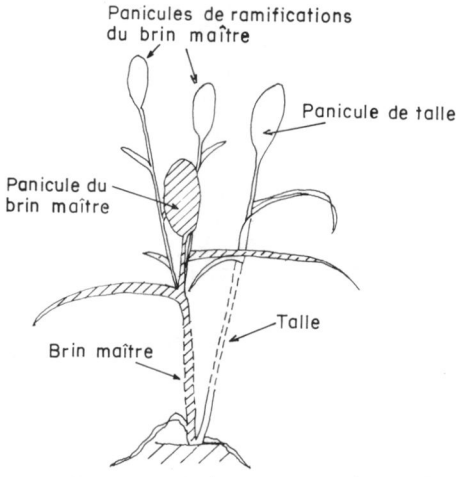


FIG. 3. — *Schéma des principaux organes d'un pied de sorgho*

Enfin, bien que ceci n'ait pas été mentionné sur les graphiques, il a été observé le plus souvent un parallélisme assez exact entre les croissances des racines et des tiges et feuilles, y compris lors des reprises de croissance des brins maîtres, ou de leurs talles et ramifications.

b) *Stade de développement et dimensions des panicules* (tabl. 2).

L'apparition des premières ébauches des ramifications des panicules, des premières ébauches de glumes, d'épillets, d'étamines, de stigmates se fait simultanément dans tous les traitements.

Cependant, le temps nécessaire pour que toute la panicule parvienne à un stade donné est en général plus long pour les plantes traitées que pour les plantes témoins. Ceci a été indiqué notamment pour la floraison (tabl. 2). Les sécheresses pourraient donc entraîner un certain échelonnement dans les différenciations des ébauches et des fleurs. Cette hypothèse sera discutée plus loin, en rapport avec les nombres de grains.

Le nombre de ramifications qui composent chaque panicule a d'ailleurs été diminué pour le traitement 3-4 (15 ramifications pour 40 ailleurs), ce qui montre de façon nette dans ce cas que le nombre d'ébauches florales a été diminué au cours des périodes précédant la floraison.

La longueur de la panicule, sa hauteur au-dessus du plateau de tallage, sont inférieures aux dimensions correspondantes dans les plantes témoins pour tous les traitements sauf le 4-5. Elles restent généralement inférieures à celles des témoins jusqu'à la récolte, mais les différences sont surtout notables pour les plantes des

TABLEAU 2

Stades de développement et caractéristiques des panicules
(traitements à forte dose d'azote)

Dates	25-6	30-6	7-7	10-7	19-7	4-8	23-8	13-9	8-11
Jours après semis	25e	30e	37e	40e	49e	65e	84e	111e	Récolte 161e
Témoin									
Hauteur panicule (cm)	1,2	2,3	3,0	7,5	21,5	93,0	96,0	101,0	102,0
Longueur panicule (cm)	—	0,1	0,2	0,7	19,0	24,0	26,5	24,8	26,0
Stade		Ébauches de ramifications	Début apparition épillets	Glumes croiss. des ramific.	Gonflement Panicules prêtes à fleurir	Fin floraison	Début coloration du grain gr. pâteux		Récolte
1-2									
H (cm)				4,0	20,5	90,0			96
L (cm)				0,4	20,2	24,0			26,5
									41 ramific. par panicule
2-3									
H (cm)					12,5	89	88		88
L (cm)					4,8	22,6	22		21
						léger retard à la floraison			42 ramific. par panicule
3-4									
H (cm)						34			
L (cm)					Gonflement	3	3	6	6
						Retard à épiaison et floraison			15 ramific. par panicule
4-5									
H (cm)							99	105	99
L (cm)							25,5	25	26
									41 ramific. par panicule
1-3									
H (cm)					10,5	87	99		89
L (cm)					9	23,6	22,3		24
					léger retard à l'épiaison	léger retard à la floraison			40 ramific. par panicule
2-4									
H (cm)						34	55	44	42
L (cm)						15,7	16,3	15,7	15,7
						léger retard à la floraison			43 ramific. par panicule
3-5									
H (cm)							30	50	48
L (cm)						retard à la floraison	14	16	16
									40 ramific. par panicule

traitements 2-4, 3-5, et 3-4. Dans ces derniers cas d'ailleurs, un décalage important par rapport à la floraison des témoins a été noté : les panicules de ces plantes n'étaient pas entièrement dégagées des gaines foliaires par suite d'un arrêt important de la croissance de la tige principale.

Ce phénomène a entraîné une levée de la dominance apicale des brins maîtres ; en effet, dans ces 3 traitements, les talles et les ramifications issues de la tige principale (fig. 3) se sont développés de façon importante.

B. — *Évolution des surfaces foliaires moyennes par pied* (tabl. 3)

Les portions de feuilles jaunies ou nécrosées ont été éliminées des mesures.

On peut remarquer qu'en conditions normales (témoin), les talles comptent pour 35 p. 100 de la surface foliaire totale au stade gonflement. Cette importance diminue ensuite très rapidement (1), la contribution des talles étant nulle à la floraison.

Par contre dans les traitements précoces (1-2, 2-3, 1-3), les talles participent pendant plus longtemps à la croissance globale de la plante. Bien que la surface foliaire des brins maîtres ait toujours été diminuée par rapport au témoin, il s'ensuit que la surface globale par pied n'a pas été diminuée dans les mêmes proportions.

Pour les traitements moins précoces et plus longs (3-4, 2-4, 3-5), les surfaces foliaires à la fin de la période de sécheresse sont inférieures à celles des témoins malgré les talles et les ramifications de la tige principale. Mais dans les périodes suivantes, les surfaces totales par pied deviennent toutes supérieures à celles du témoin pour deux raisons :

— reprise de la croissance des brins maîtres, qui se poursuit donc au-delà de celle des témoins,
— augmentation importante de la surface foliaire des talles et des ramifications.

Ces résultats sont bien en accord avec l'interprétation des courbes de croissance.

C. — *Variations de la transpiration après les traitements* (tabl. 4)

Pendant les traitements, la transpiration est la variable imposée. Mais ensuite, ses variations peuvent refléter les modifications de morphologie ou d'activité induites par les sécheresses.

Malgré l'élimination des fluctuations climatiques (expression de la sécheresse par le rapport $\frac{T_i}{\overline{T}_t}$), des difficultés dans l'analyse de ces variations ont surgi. Il existe en effet des différences de vigueur importantes entre les pots : avant même que les traitements ne soient appliqués, l'indice $\frac{T_i}{\overline{T}_t}$ a varié de 0,88 à 1,24. Les conditions d'applications des tests statistiques classiques (F, méthode de Duncan) n'étaient pas toujours réalisées, il n'a donc pas été possible d'utiliser systématiquement ces méthodes.

(1) Cette diminution est moins rapide au champ.

TABLEAU 3. — *Surfaces foliaires par pied* (en cm²) (traitement à forte dose d'azote)

		Jours après semis										
		30e 1 Fin tallage	Période 1-2	40e 2 Montaison	Période 2-3	49e 3 Gonflement	Période 3-4	65e 4 Fin floraison	Période 4-5	84e 5 Début grain pâteux		111e
Témoin	Surface totale	319		1 643		3 408		1 530		1 143		544
	Talles et Ramificat. (%)	9		29		35						
	T. + R. par période (%)		19		32		17	—		—		
	S. totale par période...		981		2 525		2 469		1 336		843	
1-2	Surface totale			662		3 209		1 801				
	Talles et Ramificat. (%)		8	8		37		22				
	T. + R. par période (%)				22		29					
	S. totale par période...		490		1 935		2 505					
2-3	Surface totale					1 687		1 708		1 274		
	Talles et Ramificat. (%)					25		10		15		
	T. + R. par période (%)				27		17		12			
	S. totale par période...				1 665		1 697		1 491			
3-4	Surface totale							724		1 359		1 123
	Talles et Ramificat. (%)									19		15
	T. + R. par période (%)						17		9		17	
	S. totale par période...						2 066		1 041		1 241	
4-5	Surface totale									430		427
	Talles et Ramificat. (%)											
	T. + R. par période (%)											
	S. totale par période...								980		428	
1-3	Surface totale					1 502		1 281		1 185		
	Talles et Ramificat. (%)			15		22	15	9		15		
	T. + R. par période (%)								12			
	S. totale par période...			945			1 391		1 233			
2-4	Surface totale							700		2 085		967
	Talles et Ramificat. (%)				4				19	38	24,5	11
	T. + R. par période (%)											
	S. totale par période...				2 054				1 392		1 526	
3-5	Surface totale									886		1 086
	Talles et Ramificat. (%)						29,5			24	28	32
	T. + R. par période (%)											
	S. totale par période ...						1 208				986	

TABLEAU 4

Variations de l'indice de transpiration

$$\frac{T_i}{T_t} = \frac{\text{Transpiration des plantes traitées}}{\text{Transpiration des plantes témoins}}$$

Périodes	30e au 40e j	40e au 49e j	49e au 65e j	65e au 84e j	84e au 111e j	111e au 161e j
Traitements	Fin tallage montaison	Montaison gonflement	Gonflement fin floraison	Fin floraison début grain pâteux		Récolte
Témoin N_2 (dose N forte)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Témoin N_1 (dose N faible)	# 1,00	0,87	0,72	0,61	0,67	0,73
1-2	0,49	0,90	1,09	0,98	0,92	0,82
2-3	1,12	0,56	0,93	0,92	1,07	0,99
3-4	1,18	1,24	0,53	0,78	1,17	1,20
4-5	1,13	1,16	1,05	0,52	0,68	1,00
1-3 N_2	0,49	0,47	0,82	0,83	0,88	0,88
1-3 N_1/1-3 N_2	1,09	1,05	0,79	0,74	0,73	0,66
1-3 N_1/Témoin N_1	0,52	0,51	0,90	1,01	0,95	0,80
2-4 N_2	1,06	0,56	0,49	0,84	1,11	0,99
2-4 N_1/2-4 N_2	0,91	0,91	0,83	0,49	0,58	0,57
2-4 N_1/Témoin N_1	0,97	0,58	0,52	0,79	0,97	0,77
3-5 N_2	1,12	1,12	0,54	0,52	0,87	1,61
3-5 N_1/3-5 N_2	0,94	0,89	0,78	0,86	0,69	0,61
3-5 N_1/Témoin N_1	1,05	1,13	0,58	0,58	0,89	1,35

0,49 Effet pendant la période de traitement.

0,78 Effet d'arrière-action.

Nous considérons qu'il y a un arrière-effet dépressif sur la transpiration lorsque les valeurs $\frac{T_i}{T_t}$ sont inférieures à 0,85. Nous pouvons également supposer une « vigueur » supérieure à celle des témoins si T_i devient nettement supérieur à 1. Les causes de ces variations seront discutées dans la troisième partie.

Dans ces conditions, 3 comportements différents s'observent :

— aucune arrière-action mesurable de transpiration après la période de sécheresse (1-2, 2-3),

— arrière-action dépressive un certain temps (20 jours 4-5 ; 30 jours 1-3), puis $\frac{T_i}{T_t}$ redevient peu différent de 1,

— arrière-action dépressive (3-4 et 2-4) ou non (3-5), suivie d'une phase durant laquelle $\frac{T_i}{T_t}$ reprend des valeurs voisines ou supérieures à 1. Ce phénomène dure plus ou moins longtemps, mais il est en concordance avec les variations de surface foliaire.

D. — *Traitements à dose d'azote réduite*

Les pots témoins de cette série ont un indice de transpiration qui décroît avec le temps. Il s'agit d'un effet azote, puisqu'aucune sécheresse n'était appliquée, effet probablement lié à des réductions de surface foliaire, bien que ces mesures n'aient pas été faites.

Les autres séries, comparées à ce témoin N_1 à nutrition azotée faible, ne montrent des actions dépressives que pour le traitement 2-4 pendant 18 jours. De plus, le traitement 3-5 a un indice plus élevé à la fin de son cycle ; il s'agit d'un phénomène analogue à celui rencontré dans le traitement 3-5 N_2, quoique moins intense.

Pendant la période de sécheresse imposée, seul le traitement 1-3 N_1 s'est comporté comme son homologue N_2. Pour les autres périodes, le comportement est à rapprocher de celui du témoin N_1 par rapport au témoin N_2 : à partir du gonflement, les transpirations deviennent inférieures à celles observées dans les traitements correspondants à azote fort.

II. — Résultats obtenus a la récolte

Les panicules des différents traitements ont été récoltées simultanément ; les humidités du grain à la récolte variaient en général de 9 à 12 p. 100. Les grains provenant des talles ou des ramifications étaient cependant un peu plus humides, surtout pour les deux traitements les plus tardifs où les grains des ramifications avaient 19 et 14 p. 100 d'eau.

Les résultats moyens par organe et par traitement sont donnés au tableau 5. Le faible nombre de répétitions par rapport au nombre des traitements, l'hétérogénéité entre plantes et entre pots ont quelque peu perturbé l'interprétation statistique.

Les pots ont été alors répartis en 2 séries :

— d'une part, tous les traitements à dose d'azote élevée et leur témoin,

— d'autre part, tous les traitements à dose d'azote faible et leurs homologues à dose d'azote forte, les 2 témoins.

L'homogénéité des variances a été contrôlée systématiquement par le test de

TABLEAU 5

Résultats à la récolte (matière sèche en g/pot)

	Racines	Tiges et feuilles		Panicules sans grain		Poids de grains		Matière sèche totale		Nbre de grains/pot		Poids de 1 000 grains		
		Total	Brins maîtres	Total	Brins maîtres	Total	Brins maîtres	Total	Brins maîtres	Total	Brins maîtres	Brins maîtres	Talles	Ramific.
Colonnes	1	2		3		4		5		6		7		
Témoin N_2	29,9	127,5	127,5	30,5	30,5	102,5	102,5	290,5	290,5	3 766	3 766	27,3	—	—
Témoin N_1	20,0	96,2	96,2	26,4	26,4	65,2	65,2	207,9	207,9	3 155	3 155	20,8	—	—
1-2	47,7	98,7	85 86 %	29,7	27,9 94 %	97,4	93,7 96 %	273,7	254,4 93 %	3 402	3 236 95 %	29,1	22,8	—
2-3	41,4	101,2	101,2	27,6	27,6	106,4	106,4	276,7	276,7	4 372	4 372	24,4	—	—
3-4	22,7	117,5	65,0 55 %	33,5	2,1 6 %	97,1	4,6 5 %	270,9	94,5 35 %	3 812	174 5 %	26,6	19,5	26,7
4-5	32,1	123,7	115,0 93 %	37,5	37,5	69,3	69,3	262,7	254,00 97 %	4 407	4 407	15,8	—	—
1-3 N_2	31,1	86,2	70,0 81 %	23,4	23,4	73,9	73,9	214,8	198,5 92 %	2 353	2 353	31,4	—	—
1-3 N_1	17,3	61,2	61,2	19,5	19,5	60,1	60,1	158,2	158,2	2 395	2 395	25,2	—	—
2-4 N_2	24,4	95	61,2 64 %	25,9	13,9 54 %	83,2	63,1 76 %	228,6	162,7 71 %	2 856	2 147 75 %	29,7	29,3	30,5
2-4 N_1	16,5	70,0	57,5 82 %	16,1	13,7 85 %	45,2	44,3 98 %	147,6	132 89 %	1 719	1 690 98 %	26,7	—	31,0
3-5 N_2	62,3	136,2	73,7 54 %	29,2	4,4 15 %	46,5	12,6 27 %	274,3	153,1 56 %	1 661	463 28 %	27,2	—	28,3
3-5 N_1	30,2	93,7	63,7 68 %	28,2	6,2 22 %	42,5	11,8 28 %	194,7	112 58 %	2 025	515 25 %	22,9	—	20,3

Bartlett (DAGNELIE, 1969) ; les différences entre traitements ont été analysées par le test de Duncan (DAGNELIE, *op. cit.*) lorsque les variances étaient homogènes. Les résultats sont donnés en annexe.

A. — *Production des grains et ses composantes*

1. *Poids des grains* (tabl. 5, col. 4 ; fig. 4).

a) *Traitements* N_2.

Production des brins maîtres seuls.

Avant le gonflement, les périodes de sécheresse courtes n'ont pas d'action dépressives sur la production de grain des brins maîtres (1-2, 2-3). Une action dépressive ne se manifeste que si cette sécheresse est longue (20 jours : cas du 1-3).

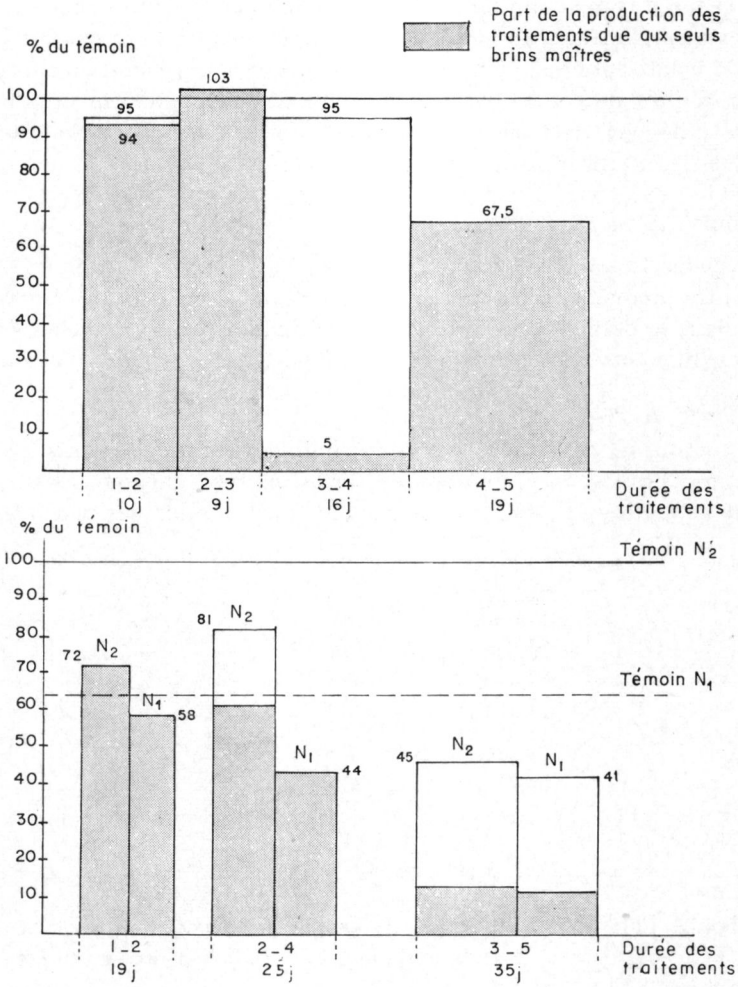


FIG. 4. — *Production de grains selon les traitements*

Après le stade gonflement, la production de grains des brins maîtres est toujours diminuée. Elle est presque nulle si la sécheresse dure du gonflement à la fin floraison (3-4) ou se prolonge jusqu'au stade grain pâteux (3-5) ; elle diminue de façon très significative si la sécheresse intéresse les périodes montaison-fin floraison (2-4) et fin floraison-grain pâteux (4-5).

Production de la plante entière.

Les compensations apportées par les talles et les ramifications sont totales pour le traitement gonflement-fin floraison (3-4), moins complètes pour le traitement montaison-fin floraison (2-4) et encore moins complètes pour le traitement gonflement-grain pâteux (3-5).

Les applications agronomiques et les portées exactes de ces compensations seront discutées plus loin.

b) *Effet de la nutrition azotée.*

Celle-ci n'est facteur limitant pour la production des brins maîtres que chez les témoins bien alimentés en eau, et pour le traitement montaison-floraison (2-4).

Pour la plante entière, une forte nutrition azotée a en général un effet favorable sur les possibilités de compensation. Seul, le traitement gonflement-grain pâteux (3-5) ne se différencie pas selon la nutrition azotée, confirmant donc bien l'effet déterminant de la sécheresse pour cette période.

2. *Composantes de la production de grains.*

Nous avons examiné dans un autre travail (LANGLET et ALDHUY, 1971) les relations entre production de grains, nombre de grains, poids de 1 000 grains. Sans entrer ici dans le détail de ces relations, nous indiquerons sur quelle composante l'action des différents traitements s'est manifestée.

a) *Nombre de panicules.*

L'importance de cette composante apparaît dans les traitements qui incluent la période 3-4 : les levées d'inhibition des brins maîtres, plus ou moins complètes, permettent l'apparition de talles et de ramifications portant des panicules.

Panicules par pot (moyenne des répétitions)	Témoins et autres traitements	3-4	2-4 N_2	2-4 N_1	3-5 N_2	3-5 N_1
Brins maîtres	3	0,25	3	3	1,5	1
Talles	0	1	1,5	0	0	0
Ramifications de brins maîtres	0	6	2,2	0,5	6	5

Une bonne nutrition azotée peut avoir une influence sur l'apparition de ces panicules (2-4) ; par contre, dans la période 3-5, c'est la sécheresse qui est le facteur le plus limitant.

b) *Nombre de grains* (tabl. 5, col. 6).

Traitements N_2.

Dix jours de sécheresse appliquée avant le gonflement n'ont pas eu d'action sur le nombre de grains des brins maîtres bien que le processus de différenciation des pièces florales se situe à ce moment.

D'autre part, les résultats du traitement 4-5 montrent nettement que 20 jours de sécheresse après la fécondation n'ont pas entraîné d'avortements de jeunes grains.

Cependant, le nombre de grains est diminué :

— très fortement par 16 jours de sécheresse entre le gonflement et la fin floraison (action sans doute renforcée par la rapidité d'établissement de la sécheresse, qui a « grillé » les panicules). Cet effet se retrouve dans le traitement 3-5 ;

— moins fortement, mais de façon significative, si les sécheresses précoces sont longues, par exemple 20 jours du traitement 1-3. Un manque d'eau prolongé avant le gonflement peut donc affecter le processus de différenciation des pièces florales.

Compte tenu des dates d'application des sécheresses, il est probable que ces effets sont dus plus à une diminution du nombre d'épillets qu'à une mauvaise fécondation. La dernière partie envisagera l'interprétation de ces données, en rapport avec les autres résultats.

En ce qui concerne la plante entière, les talles et les ramifications ont là aussi apporté des compensations. Cependant, si ces organes permettent de réduire plus ou moins complètement l'effet dépressif dû à la sécheresse, cette réduction résulte là du nombre parfois élevé de panicules formées. En effet, le nombre de grains par panicule issue des ramifications des brins maîtres est faible (au maximum 560 grains au lieu de 1 400 à 1 500 grains par panicule originaire des brins maîtres des pots témoins).

Effet de la nutrition azotée.

Il n'y a pas de différences au niveau des brins maîtres selon la nutrition azotée. Un effet dépressif du manque d'azote n'est noté que pour les pots témoins bien alimentés en eau, et sans doute pour la période 2-4. Mais l'absence de signification statistique pour cet écart permet difficilement de conclure.

Par contre, la nutrition azotée peut avoir un effet favorable sur les compensations pour le nombre de grains, comme le traitement 2-4 le montre.

c) *Le poids de 1 000 grains* (tabl. 5, col. 7).

L'examen des moyennes montre que les valeurs notées pour les talles et les ramifications sont du même ordre que celles des brins maîtres des pots intéressés.

Une diminution importante du poids de 1 000 grains n'est observée que pour le traitement 4-5. Elle est responsable du déficit de production de ces plantes, puisque nous avons vu que les autres composantes n'avaient pas été affectées. Une sécheresse survenant après la fécondation et s'appliquant pendant la phase de nutrition des grains peut donc perturber suffisamment cette phase pour entraîner un très net déficit de production à la récolte.

En présence de doses d'azote plus faibles, la nutrition des grains semble avoir été affectée surtout pour le témoin, le traitement 3-5 et le traitement 1-3, mais les

écarts sont peu importants (au maximum 7 g entre les 2 témoins). Il est toutefois intéressant de remarquer que le poids de 1 000 grains est systématiquement inférieur dans le cas de nutrition azotée faible.

B. — *Production des autres organes* (1)

1. *Tiges et feuilles.*

a) *Traitements N_2, dose d'azote élevée.*

Les effets dépressifs de la sécheresse sur les brins maîtres sont manifestes pour les traitements cumulés, donc de longue durée, et gonflement-fin floraison (3-4). Il n'y a pas d'effet si la sécheresse est appliquée après la floraison, la croissance de ces organes étant alors terminée.

Pour l'ensemble brins maîtres, talles, ramifications, les reprises de croissance ont été notées après l'annulation de la sécheresse, elles sont maximales et totales lorsque la sécheresse affecte les plantes à partir du stade gonflement. Avant ce stade, pour des sécheresses longues (20 jours) les compensations sont beaucoup moins importantes.

b) *Effets de la nutrition azotée.*

A période de sécheresse identique, l'azote n'a eu aucun effet sur la production des tiges et feuilles des brins-maîtres. La contrainte eau a donc été dans ce cas plus limitante à tout moment du cycle des plantes que la faible nutrition azotée.

Lorsque la contrainte eau n'est pas présente (cas des 2 témoins), une faible nutrition azotée a entraîné une diminution de la production.

La croissance des talles et des ramifications a toujours été favorisée par les doses d'azote élevées. Une faible nutrition azotée peut donc aggraver les effets dus à la sécheresse.

2. *Matière sèche totale* (tabl. 5, col. 5).

Seules les moyennes des traitements les plus longs (1-3) (2-4) appliqués lors d'une période de croissance importante pour la matière sèche totale s'écartent de l'ensemble des autres résultats.

$$\text{Rapport } \frac{\text{grain}}{\text{matière sèche totale}}$$

Traitements	2-3	1-3 N_1	2-4 N_2	3-4	1-2	T N_2	1-3 N_2	T N_1	2-4 N_1	4-5	3-5 N_1	3-5 N_2
Rapports : grain/MS totale	0,385	0,380	0,363	0,357	0,354	0,352	0,343	0,313	0,305	0,263	0,219	0,169

(1) Il n'a pas été possible de mettre en évidence une action précise des traitements sur les racines (importantes différences entre chaque répétition). On se bornera à constater (tabl. 5) un certain parallélisme entre ces organes et les tiges et feuilles, ainsi que l'effet favorable de la nutrition azotée.

Il est également normal de constater que la nutrition azotée a toujours eu un effet marquant surtout pour les deux traitements précédents.

Par rapport à la matière sèche totale, la production de grains a surtout été diminuée :

— dans les traitements les plus tardifs : dans ce cas, les talles ou les ramifications ont intéressé principalement la production d'organes végétatifs, ou bien la production de grains a diminué plus que celle des autres organes (4-5) ;

— dans les traitements à dose d'azote faible : excepté la période 1-3, la production de grains a été proportionnellement plus réduite que celle de la matière sèche totale.

DISCUSSION

Un premier aspect de la discussion permettra de confronter les variations de transpiration aux modifications de la surface foliaire et de son activité.

Le deuxième aspect envisagera les résultats obtenus sur les grains. Nous chercherons à préciser à quelle (s) période (s) la production de grains est la plus sensible à la sécheresse, et par l'intermédiaire de quelle composante.

I. — Variations de la transpiration

Il est intéressant, comme l'a fait Robelin (1967), d'examiner si les variations de transpiration sont en rapport avec les variations de la surface foliaire des plantes traitées par rapport aux plantes témoins (effet morphologique) ou bien à une variation de l'activité par unité de surface (effet plus physiologique).

En utilisant un raisonnement identique à celui de Robelin (*op. cit.*) et en employant les mêmes notations, nous pouvons calculer pour chaque période de sécheresse et d'arrière-action (tabl. 6) :

— l'indice d'activité globale a.g. $= \frac{T_t}{T_t}$, cet indice peut s'écrire aussi

$$\frac{\text{Photosynthèse nette par pot traité}}{\text{Photosynthèse nette par pot témoin}}$$

En effet, on montre facilement (fig. 5) que transpiration et photosynthèse sont dans le même rapport. Ces variations concomitantes de la transpiration et de la photosynthèse ont déjà été établies par Robelin (1962, 1967).

— l'indice de surface foliaire

$$s = \frac{S_t}{S_t} = \frac{\text{Surface foliaire moyenne par pot traité}}{\text{Surface foliaire moyenne par pot témoin}}$$

— l'indice d'activité par unité de surface $a = \frac{\text{a.g}}{s}$.

TABLEAU 6

Indices d'activité et de surface foliaire

	Période de traitement			Première période d'arrière-action			Deuxième période d'arrière-action		
	ag	*s*	*a*	ag	*s*	*a*	ag	*s*	*a*
1-2	30e au 40e j 0,49	0,50	0,98	40e au 49e j 0,90	0,76	1,18	49e au 65e j 1,09	1,07	1,08
2-3	40e au 49e j 0,56	0,66	0,84	49e au 65e j 0,93	0,68	1,36	65e au 84e j 0,92	1,11	0,83
3-4	49e au 65e j 0,53	0,83	0,63	65e au 84e j 0,78	0,78	1	84e au 111e j 1,17	1,47	0,80
4-5	65e au 84e j 0,52	0,73	0,71	84e au 111e j 0,68	0,51	1,33	Mesures non effectuées		
1-3 N_2	30e au 49e j 0,48	0,51	0,94	49e au 65e j 0,82	0,56	1,46	65e au 84e j 0,83	0,92	0,90
2-4 N_2	40e au 65e j 0,52	1,03	0,50	65e au 84e j 0,84	1,04	0,81	84e au 111e j 1,11	1,81	0,61
3-5 N_2	49e au 84e j 0,53	1,37	0,39	84e au 111e j 0,87	1,16	0,75	Mesures non effectuées		

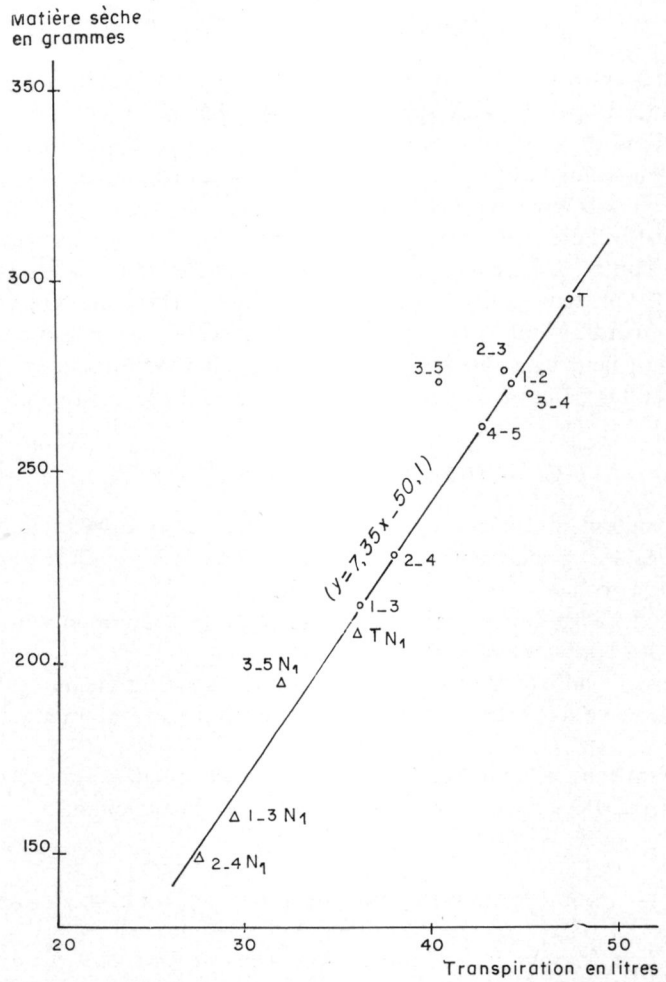


FIG. 5. — *Transpiration et production de matière sèche totale et de grains*

A. — *Périodes de sécheresse imposée*

Les traitements précoces, longs ou courts (1-3, 1-2, 2-3) ont surtout fait diminuer la surface foliaire, alors que pour les tardifs longs (3-5), on note dès cette période une surface supérieure à celle des témoins (talles, ramifications).

L'activité par unité de surface varie quant à elle, exactement en sens inverse : elle est d'autant plus diminuée que le traitement est plus tardif et long.

Par conséquent, dans les premières phases de croissance, la sécheresse a surtout agi en entraînant des variations morphologiques (réduction de surfaces foliaires). Dans les phases plus tardives, cette réduction se manifeste moins ou pas du tout, mais la sécheresse entraîne alors une diminution plus importante de l'activité par unité de surface, susceptible de traduire une « adaptation physiologique » (régulation stomatique...).

B. — *Première période d'arrière-action*

Ce retour à une alimentation hydrique optimale provoque dans tous les cas une reprise de l'activité par unité de surface. Pour les sécheresses courtes, cette activité mesurée par l'indice *a* est soit supérieure, soit égale à celle du témoin, mais elle reste malgré tout plus faible et inférieure à 1 pour les traitements longs et tardifs. L'effet dépressif se manifeste donc encore.

La surface foliaire a augmenté notablement chez les plantes jeunes 1-2 ; elle continue, par contre, à diminuer dans les traitements les plus tardifs (3-4, 4-5) ou se stabilise (3-5). On peut penser que l'âge et le développement assez avancés des plantes provoquent ce fait ; cependant un effet dépressif sur la surface foliaire est toujours présent pour les traitements 3-4, 4-5, 1-3, effet suffisant pour que l'activité globale des plantes de ces pots soit encore inférieure à celle des témoins.

C. — *Deuxième période d'arrière-action*

Pour les traitements où les mesures ont été faites, les surfaces foliaires deviennent sensiblement égales ou supérieures à celles du témoin. Il n'y a donc plus là d'action dépressive de la sécheresse sur cette caractéristique.

Par contre, l'activité par unité de surface foliaire a diminué dans tous les cas, surtout pour les traitements tardifs et longs.

Le potentiel photosynthétique des feuilles de ces traitements (3-4, 2-4) n'est donc pas aussi élevé que celui du témoin (port buissonnant, interaction avec le type d'abri...).

L'augmentation de la surface foliaire est cependant suffisamment sensible pour que l'activité globale soit égale ou supérieure à celle du témoin.

II. — Production de grains, sensibilité a la sécheresse

A. — *Production de grain et composantes du rendement dans les différents traitements*

1. *Traitements* N_2.

Les résultats obtenus sur le poids de grain mettent en évidence l'influence des composantes du rendement en fonction des dates d'application des sécheresses. Ces composantes pourront dans certains cas être reliées à des phénomènes ayant trait au développement de la plante : échelonnement des différenciations des fleurs, levée de la dominance apicale des brins maîtres.

a) *Traitements précoces 1-2, 2-3, 1-3.*

Seul le traitement 1-3 montre un poids de grain inférieur à celui du témoin, ce qui est dû à une diminution du nombre de grains, elle-même liée très vraisemblablement à une diminution du nombre des ébauches et donc des fleurs formées.

La non-réaction des traitements 1-2, 2-3, plus courts, peut s'expliquer en avançant l'hypothèse des échelonnements des différenciations des fleurs sur une période suffisamment longue pour que ce phénomène puisse reprendre à son niveau normal après l'annulation de la sécheresse.

Ces 2 traitements auraient été appliqués pendant une partie seulement de la période possible de différenciation. Par contre, le traitement 1-3, plus long, affecterait une part plus importante de cette période, entraînant une diminution du nombre d'ébauches et de fleurs, révélée par l'observation du nombre de grains.

On peut citer également à l'appui de cette hypothèse le léger retard à la floraison enregistré pour le traitement 2-3, qui pourrait témoigner de différenciations plus tardives sans que le nombre de grains en ait souffert.

Dans ces traitements, la contrainte de sécheresse n'a pas permis de lever de façon significative la dominance apicale des brins maîtres.

b) *Traitements comportant la période gonflement-floraison 3-4, 2-4, 3-5.*

Tous ces traitements sont caractérisés par une levée plus ou moins complète de la dominance apicale des brins maîtres : les ramifications de la tige, et dans certains cas les talles, ont formé des grains. Cette récolte a même été très importante dans le cas du 3-4, puisqu'elle se situe à un niveau égal à celui du témoin, malgré la disparition pratiquement totale des panicules des brins maîtres.

Le poids de 1 000 grains de ces ramifications n'a pas été altéré (sauf peut-être un effet de l'azote en 3-5). Par contre, l'évolution de leurs ébauches florales est compromise si la sécheresse se prolonge trop tardivement. C'est le cas du traitement 3-5, où le nombre de grains par panicule portée par les ramifications est inférieure à celui observé dans le cas du traitement 3-4 pour ces mêmes organes (3-5 = 2 000 grains ; 3-4 = 500 grains). Comme pour les brins-maîtres, l'évolution des ébauches des ramifications peut donc être compromise si la sécheresse est appliquée pendant une trop grande partie de cette période d'évolution.

Dans ces 3 traitements, la production de grains des brins maîtres a été affectée par destruction des ébauches ou des fleurs, comme l'indique le nombre de grains diminué dans les 3 cas. Le poids de 1 000 grains n'a pas été altéré.

Cette diminution est cependant plus faible pour le traitement 2-4, et la part des talles et des ramifications dans la récolte est moins importante que dans les autres traitements. La dominance apicale, bien que moins marquée que dans le traitement 1-3, n'a pas été autant supprimée qu'en 3-4 et 3-5. Les conditions d'applications de la sécheresse, moins brutales qu'en 3-4 et moins longues qu'en 3-5, peuvent sans doute en rendre compte.

L'ensemble de ces observations montre cependant l'importance de la période gonflement-floraison pour la production de grains, période qui semble également être celle où les possibilités de compensation sont maximales. Les applications agronomiques seront discutées plus loin.

c) *Traitement 4-5.*

Dans ce cas, la diminution du poids de grains des brins maîtres est due au seul poids de 1 000 grains, nettement inférieur à celui des autres traitements. Le nombre de grains est lui égal à celui du témoin.

Les fécondations se sont donc effectuées normalement, mais la nutrition des grains a été perturbée de façon importante.

D'autre part, à cette période, il n'y a plus de possibilités de levée de la dominance exercée par les brins maîtres sur les autres bourgeons.

Nous pouvons donc conclure que :

— les sécheresses intervenant avant la floraison diminuent la récolte par l'intermédiaire du nombre de grains. La « résistance » des plantes en cas de sécheresse précoce et courte (une dizaine de jours avant le gonflement) peut provenir d'un échelonnement des différenciations des fleurs ;

— en cas de sécheresse entre le gonflement et la floraison, période qui apparaît particulièrement sensible, la plante a la possibilité, en certaines conditions de milieu, de développer des ramifications par levée de la dominance apicale des brins maîtres. Ces ramifications peuvent compenser les pertes de production des brins maîtres ;

— si la sécheresse intervient dans les premières phases de la nutrition des grains, la production est diminuée par l'intermédiaire du poids de 1 000 grains sans possibilités de compensation.

2. *Effets de la nutrition azotée.*

Nous avons déjà noté l'effet d'une bonne nutrition azotée sur les possibilités de compensation exercées par les talles et les ramifications (période 2-4). Cependant, cet effet favorable ne se manifeste pas si la dominance apicale n'est pas suffisamment levée (période 1-3) ou si la sécheresse est trop contraignante (période 3-5).

Les résultats observés sur les seuls brins maîtres montrent que la différence de poids de grains entre les 2 témoins est due à une différence sur le nombre de grains. Cette remarque permet d'avancer l'hypothèse d'une relation entre nutrition azotée et développement, en l'absence de sécheresse. Une nutrition azotée plus faible pourrait donc empêcher l'évolution d'un aussi grand nombre d'ébauches que dans le cas d'une nutrition azotée plus favorable.

En présence de sécheresse, nous ne retrouvons pas d'effet similaire de l'azote sur les brins maîtres, l'effet eau paraissant prédominant. Seul le traitement 2-4 semble indiquer une différence selon le niveau de nutrition azotée, mais la non signification statistique de cet écart en rend l'interprétation plus difficile.

B. — *Sensibilité à la sécheresse, applications agronomiques*

L'examen global des résultats fournis par les plantes entières, sans distinguer les talles où les ramifications, indiquent les sensibilités suivantes :

— 35 jours de sécheresse entre gonflement et début grain pâteux (3-5), déficit par rapport au témoin : 55 p. 100 ;

— 19 jours entre fin floraison et début grain pâteux (4-5), déficit de 30 p. 100 ;

— 19 jours entre fin tallage et gonflement (1-3), déficit de 25 p. 100 ;

— 25 jours entre montaison et fin floraison (2-4), déficit de 30 p. 100.

Si la nutrition azotée est trop réduite, il peut y avoir aggravation de ces effets, sauf si la sécheresse est de toutes façons trop contraignante (traitement 3-5).

Mais nous avons vu que ces résultats globaux étaient souvent dus à une par-

ticipation très importante des talles et des ramifications, qui a pu masquer les effets sur les brins maîtres. La part de ces organes atteint :

95 p. 100 dans le traitement gonflement-fin floraison (3-4),
73 p. 100 dans le traitement gonflement-début grain pâteux (3-5),
24 p. 100 dans le traitement montaison-fin floraison (2-4).

La période gonflement-fin floraison est incluse dans ces 3 traitements, ce qui révèle bien son importance pour la production finale.

Il faut souligner que ces résultats sont issus d'un essai en conditions spéciales (cultures en pots), avec une fertilisation largement assurée, au moins pour le traitement N_2. Une fertilisation azotée réduite a d'ailleurs montré que, dans ce cas, la participation des talles et des ramifications étaient diminuée.

Dans le contexte climatique et cultural du sud de la France, il est permis de s'interroger sur les réelles possibilités qu'aurait le sorgho à montrer une aussi grande souplesse de comportement. Nos essais antérieurs (LANGLET et VIARD, 1970 ; LANGLET et ALDHUY, 1971) ont montré que le tallage pouvait se produire même à des densités de peuplements très élevées, mais qu'ils ne produisent du grain en quantité notable que lorsque la densité de peuplement est extrêmement faible. Ces observations ont été faites en culture sèche comme en culture irriguée. Pour les techniques culturales, le tallage est d'ailleurs considéré comme une gêne (homogénéité de maturité à la récolte) et on cherche à l'éliminer ou à le réduire le plus possible.

Quant aux ramifications de brins maîtres, DECAU (1968) a observé leur apparition sous l'effet de très fortes fumures azotées. Les conditions courantes de culture pratiquées dans nos régions (variété, peuplement, fertilisation...) font douter de leurs chances réelles d'apparition et de contribution importante à la récolte. Dans l'affirmative, resterait posé le problème de leur maturité : nous avons noté qu'elle était moins avancée que celle des brins maîtres, malgré des conditions favorables (abri ventilé).

Ces remarques laissent supposer qu'une production de grains à partir de talles ou de ramifications de tiges principales après un déficit d'alimentation en eau serait, sinon inexistante, du moins beaucoup plus réduite que ce que nous avons observé. Néanmoins, il est possible que dans d'autres conditions : régions à déficit hydrique plus précoce, plus intense et durant plus longtemps, techniques de cultures différentes, les potentialités d'adaptation du sorgho grain à la sécheresse puissent être effectivement utilisées.

Nous pouvons donc conclure que :

1° Un déficit d'alimentation en eau intervenant entre le stade gonflement et la fin floraison peut entraîner une réduction de la production de grain très importante sinon pratiquement totale.

2° Le déficit survenant de la fin floraison au début du stade grain pâteux entraîne une chute de la production de grains pouvant atteindre 30 p. 100.

3° Un déficit d'alimentation en eau intervenant à partir de la fin du tallage jusqu'au gonflement peut lui aussi faire baisser la production : 25 p. 100 dans notre essai.

Les diverses observations faites sur la valorisation de l'eau d'irrigation par le sorgho (MARTY, 1971 ; CAVALAN, 1972) montrent que cette plante valorise

mal des irrigations intensives, conçues par exemple pour assurer l'ETM de la culture (1).

Si l'ensemble climat-sol nécessite des irrigations, ces interventions sont donc à réserver d'abord à la période gonflement-grain pâteux, puisque c'est à ce moment qu'elles auront le plus de chances d'être valorisées par la production de grains à partir des brins maîtres. Des interventions plus précoces et plus intensives ne paraissent justifiées que par l'installation d'un déficit en eau important commençant au début du cycle de la plante et se maintenant ensuite.

CONCLUSIONS

Les actions et arrière-actions de la sécheresse ont été interprétées, d'une part globalement sur la plante entière par les variations de transpiration, et d'autre part, à une échelle plus fine au niveau des composantes de la production de grains.

Les variations de transpiration peuvent être expliquées selon deux modalités : l'une d'ordre morphologique (surface foliaire) intervenant surtout dans les traitements précoces, l'autre d'ordre plus physiologique (activité par unité de surface) intervenant elle surtout dans les traitements tardifs ou longs.

A l'échelle plus fine des composantes du rendement, il semble que l'action des différentes périodes de sécheresse sur la production des grains puisse s'expliquer par l'hypothèse d'un échelonnement des différenciations des ébauches de fleurs, possible sur une durée assez longue. Si la sécheresse n'intéresse qu'une partie de cette durée, les différenciations pourraient reprendre ensuite sans que les composantes du rendement, et le rendement lui-même, ne subissent de gros préjudices.

Si, par contre, la sécheresse est appliquée pendant une période trop longue, ou si ces différenciations ne sont plus possibles (après la floraison), la production de grains peut être gravement compromise. Les sensibilités des différentes périodes ont été précisées.

D'autre part, il a pu être montré que certaines sécheresses, appliquées avant la floraison, pouvaient entraîner une levée de la dominance exercée par les brins maîtres sur les autres bourgeons, qui évoluent alors jusqu'à la formation de panicules. La contribution de ces ramifications à la production de grains par la plante peut être importante. Il faut noter cependant qu'une sécheresse appliquée durant le temps de la mise à fleur de ces ramifications diminue leur contribution à la récolte des grains.

Par conséquent, il conviendrait de vérifier les hypothèses ayant trait à l'échelonnement des processus de développement du sorgho grain. Il serait également nécessaire de préciser le mécanisme intime d'action de la sécheresse sur ces processus, en relation avec la nutrition minérale (notamment relation nutrition azotée — nombre d'ébauches évoluées en fleurs — nombre de grains).

Le comportement du sorgho grain vis-à-vis de la sécheresse est donc assez

(1) Ces observations vont dans le même sens que les résultats obtenus à la Station expérimentale du Texas et à la Station expérimentale d'Asport de la Compagnie nationale d'Aménagement du Bas-Rhône Languedoc, résultats cités par Cotte (1966).

différent de celui d'autres plantes cultivées comme le maïs ou le tournesol, puisque cette plante possède des facultés importantes d'adaptation ou de compensation par les talles ou les ramifications.

Il est indispensable de vérifier par des observations au champ, dans des unités pédoclimatiques différentes, si ces compensations peuvent se produire en conditions courantes de culture. Il faut noter qu'une fertilisation azotée trop faible peut réduire leur importance, tout en aggravant les effets dus à la sécheresse.

En tenant compte de ces remarques, il apparaît alors que la production de grains fournis par les tiges principales, sera particulièrement sensible à la sécheresse si cette dernière survient entre le stade gonflement et le stade grain pâteux. Une certaine sensibilité existe également pour les périodes précédentes, si la sécheresse est trop longue et prononcée.

L'irrigation de cette culture sera donc valorisée au mieux pour des apports d'eau intéressant ces périodes. Il est de toute façon nécessaire de tenir compte du moment d'apparition et de l'évolution du déficit hydrique climatique, ainsi que des réserves en eau du sol. Des précisions complémentaires sont donc nécessaires pour préciser la conduite de cette technique selon les régions et les sols.

reçu pour publication en Janvier 1973.

SUMMARY

DROUGHT EFFECTS ON THE GROWTH AND YIELD OF GRAIN SORGHUM

The behaviour of grain sorghum in relation to deficient water supply has been investigated by growing-on testing in pots under shelter. The scope of such deficiencies, for the processed plants, defined as the ratio of transpiration T_i to the transpiration T_t of the control plants, remains the same throughout, *i. e.* $\frac{T_i}{T_t} = 0.5$. The sorghum underwent these deficiencies at various stages of growth in order to find which of the latter affected the yield most and, thereby, determine the more suitable irrigation periods.

Notwithstanding a substantial compensation potential through ramification of the main stems, the more sensitive period is that extending from the grain swelling initially to becoming doughy. Drought either curtails the number of spikelets, or the weight of 1 000 grains. Earlier droughts are also damaging if in the region of 20 days.

Going into the resulting data evinced that sorghum may stagger bloom-time differentiation which might, under certain conditions, promote drought resistance. Are also set forth the variational transpiration and foliage area prior to and after the test period.

ZUSAMMENFASSUNG

AUSWIRKUNGEN DER DÜRRE AUF DAS WACHSTUM UND DIE ERZEUUNG DER SORGHOSAMEN

Das Verhalten der Sorghosamen bei Wasserversorgunsmangel wurde anhand eines Tests bei gedützter Topfplanzung erforscht. Die durch das Verhältnis zwischen der T_i — Ausdünstung der behandelten Pflanzen und der T_t — Ausdünstung der Testpflanzen bestimmte Intensität dieses Mangels, ist dieselbe für alle Behandlungen : $\frac{T_i}{T_t} = 0.5$. Dieser Wassermangel wurde in verschiedenen

Stadien des Wachstumszyklus des Sorghoms angewandt, um die empfindlichsten Perioden für die Samenerzeugung zu bestimmen und somit voraussehen zu können, zu welchem Zeitpunkt die Bewässerung am erfolgreichsten und richtig valorisiert werden kann.

Trotz sehr bedeutender Ausgleichungsmöglichkeiten durch Verästelung der Hauptstengel, erweist sich der Zeitzbschnitt, der sich von der Quellung bis zum Anfang des teigigen Stadiums des Samens ausdehnt, als der empfindlichste. Die Trockenheit wirkt entweder durch Verminderung der Aehrchenanzahl, oder durch Gewichtsverminderung von 1 000 Samen. Frühzeitigen Trockenheiten können sich auch schädlich auswirken wenn sie lange Zeit dauern (20 Tage).

Die Diskussion über die Ergebnisse lässt für den Sorgho eine Möglichkeitfür die Staffelung der Blütendifferenzierungen hervortreten, welche unter gewissen Bedingungene ein Widerstandsfaktor werden könnte.

Die Verhältnisse zwischen den Ausdünstungswechseln und den Variationen der Blattoberfläche während und nach den Behandlungen werden ebenfalls erörtert.

РЕЗЮМЕ

Влияние засухи на рост и зерновую продукцию сорго.

А. ЛАНГЛЕ.

Поведение растений сорго, культивируемого на зерно, при дефицитах водного питания, изучалось в вегетационном опыте под прикрытием. Интенсивность дефицитов, определенная при помощи соотношения между транспирацией обработанных растений (T_i) и транспирацией растений контрольных (T_t) — одинакова для всех испробованных обработок : $\frac{T_i}{T_t} = 0{,}5$. Для определения наиболее чувствительных периодов для зерновой продукции и выбора наилучшего, в смысле практических его результатов, момента орошения, водные дефициты распределялись между различными стадиями растительного цикла сорго.

Несмотря на крупные возможности компенсации, благодаря развветвлению главных стеблей, период между набуханием зерна и началом стадии вязкой зрелости, является наиболее чувствительным. Результаты действия засухи : уменьшение количества колосков и веса 1 000 зерен. Более ранние засухи приносят также большой вред, если они продолжительны (20 дней).

Рассмотрение полученных результатов доказывает возможность получения у сорго ступенчатой дифференциации цветков, которая может явиться, в определенных условиях, фактором устойчивости этого растения к засухе.

Рассматриваются также соотношения между колебаниями транспирации и изменениями листовой поверхности во время и после обработок.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Becker M., 1970. Transpiration et comportement vis-à-vis de la sécheresse de jeunes plants forestiers. *Ann. Sci. forest.*, **27** (4), 401-420.

Cavalan P., 1972. Productivité comparée du maïs et du sorgho en culture sèche ou diversement irriguée. *Coteaux de Gascogne*, **20**.

Cotte A., 1966. Culture du sorgho grain. *Bull. tech. Inform.*, **215**, 929-936.

Dagnelie P., 1969. *Théories et méthodes statistiques* Applications agronomiques. Éditions J. Duculot, Gembloux (Belgique).

DECAU J., PACE A., PUJOL B., 1968. Influence de très fortes fumures azotées sur les rendements et l'alimentation en azote du sorgho et du ray-grass. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **54**, 9, 716-724.

LANGLET A., BLANCHET R., FIORAMONTI S., 1969. Essai d'appréciation des potentialités de production des principaux milieux naturels de la région Midi-Pyrénées. I. Méthodes d'études. *C. R. Acad. Agric.*, **55**, 714-722.

LANGLET A., VIARD R., 1970. Quelques aspects de la compétition au sein de peuplements monospécifiques de sorgho et de maïs. Rôle de l'alimentation hydrique. 16 pages. *5e Colloque d'Écologie*. École normale supérieure, Paris.

LANGLET A., 1971. Essai de prévision de l'orientation de la production agricole dans diverses régions naturelles en fonction des facteurs écologiques. *Ann. agron.*, **22** (4), 425-449.

LANGLET A., Annie ALDHUY, 1971. Observations sur les composantes du rendement en grain du sorgho. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **57**, 18, 1606-1616.

MARTY J.-R., 1971. *Comparaisons maïs-sorgho-tournesol avec ou sans irrigation au cours de deux années climatiques différentes*. Comptes rendus annuels du dispositif permanent de la Station d'Agronomie de Toulouse.

ROBELIN M., 1962. Rapports entre augmentation de poids sec et transpiration en conditions de sécheresse. *C. R. Acad. Sci.*, série D, **254**, 718-720.

ROBELIN M., 1963. Contribution à l'étude du comportement du maïs grain vis-à-vis de la sécheresse. *Journées internationales de l'irrigation*, 69-76, éd. par A. G. P. M., Pau.

ROBELIN M., 1967. Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann. agron.*, **18** (6), 579-599.

ROBELIN M., 1971. *Protocole proposé pour l'étude du comportement des plantes en conditions de sécheresse*. I. N. R. A., Département Agronomie.

ANNEXES

SIGNIFICATION DES MOYENNES ENTRE LES TRAITEMENTS PAR LA MÉTHODE DE DUNCAN.
LES MOYENNES RÉUNIES PAR LE MÊME TRAIT
NE DIFFÈRENT PAS SIGNIFICATIVEMENT AU SEUIL 0,05

Ne sont figurées ici que les comparaisons faites lorsque les variances étaient homogènes (test de BARTLETT) ; dans les autres cas, on se reportera au tableau 5.

1. — *Tiges et feuilles*

Traitements	3-5	T	4-5	3-4	2-3	1-2	2-4	1-3
Plantes entières	136,2	127,5	123,7	117,5	101,2	98,7	95,0	86,2

Traitements	3-5	T	TN_1	2-4	3-5 N_1	1-3	2-4 N_1	1-3 N_1
Plantes entières	136,2	127,5	96,2	95,0	93,7	86,2	70,0	61,2

Traitements	T	4-5	2-3	1-2	3-5	1-3	3-4	2-4
Brins maîtres seuls	127,5	115	101,2	85,0	73,7	70,0	65,0	61,2

Traitements	T	TN_1	3-5	1-3	3-5 N_1	1-3 N_1	2-4	2-4 N_1
Brins maîtres seuls	127,5	96,2	73,7	70,0	63,7	61,2	61,2	57,5

2. — *Panicules, grains exclus*

Traitements	4-5	T	1-2	2-3	1-3	2-4	3-5	3-4
Brins maîtres seuls	37,5	30,5	27,9	27,6	23,4	13,9	4,4	2,1

Traitements	T	TN_1	1-3	1-3 N_1	2-4	2-4 N_1	3-5 N_1	3-5
Brins maîtres seuls	30,5	26,4	23,4	19,5	13,9	13,7	6,2	4,4

3. — *Poids de grains*

Traitements	2-3	T	1-2	3-4	2-4	1-3	4-5	3-5
Plantes entières	106,4	102,5	97,4	97,1	83,2	73,9	69,3	46,5

Traitements	T	2-4	1-3	TN_1	1-3 N_1	3-5	2-4 N_1	3-5 N_1
Plantes entières	102,5	83,2	73,9	65,2	60,1	46,5	45,2	42,5

Traitements	2-3	T	1-2	1-3	4-5	2-4	3-5	3-4
Brins maîtres seuls	106,4	102,5	93,7	73,9	69,3	63,1	12,6	4,6

4. — *Nombre de grains*

Traitements	4-5	2-3	3-4	T	1-2	2-4	1-3	3-5
Plantes entières	4 407	4 372	3 812	3 766	3 402	2 856	2 353	1 661

Traitements	T	TN_1	2-4	1-3 N_1	1-3	3-5 N_1	2-4 N_1	3-5
Plantes entières	3 766	3 155	2 856	2 395	2 353	2 025	1 719	1 661

Traitements	4-5	2-3	T	1-2	1-3	2-4	3-5	3-4
Brins maîtres seuls	4 407	4 372	3 766	3 236	2 353	2 147	463	174

Traitements	T	TN_1	1-3 N_1	1-3	2-4	2-4 N_1	3-5 N_1	3-5
Brins maîtres seuls	3 766	3 155	2 395	2 353	2 147	1 690	515	463

5. — *Matière sèche totale*

Traitements	T	2-3	3-5	1-2	3-4	4-5	2-4	1-3
Plantes entières	290,5	276,7	274,3	273,7	270,9	262,7	228,6	214,8

Traitements	T	2-3	1-2	4-5	1-3	2-4	3-5	3-4
Brins maîtres seuls	290,5	276,7	254,4	254	198,5	162,7	153,1	94,5

Ann. agron., 1973, **24** (3), 339-358.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'EFFET DES CONDITIONS D'IMPLANTATION ET DE DÉVELOPPEMENT DU TOURNESOL SUR SA PRODUCTION QUANTITATIVE ET LA COMPOSITION OLÉOPROTÉIQUE DE SA GRAINE

P. LENCREROT, J. DECAU, B. COCHARD, J.-R. MARTY et B. PUJOL
avec la collaboration technique de A. PACE et M. MONDIES

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A.,
Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, BP 12, 31320 Castanet-Tolosan

RÉSUMÉ

L'influence conjuguée de différentes conditions pédoclimatiques et culturales sur la croissance et le développement d'un tournesol (var. *INRA 65-01*) et leurs conséquences sur la production lipidique et protéique a été étudiée grâce à deux essais conduits durant deux années climatiques différentes :

— un essai principal conduit en 1970 dans lequel intervenaient les variables culturales suivantes : précédent (sorgho ou ray-grass + trèfle violet), date de labour (labour d'automne ou de printemps), alimentation hydrique (culture irriguée ou non irriguée) ;

— un essai annexe installé, en 1971, sur le même type de sol a permis d'étudier l'influence de la date de labour et celle de conditions hydromorphes.

En année climatique favorable (1970), conduisant à des rendements élevés, le labour précoce associé au précédent « sorgho » d'une part, l'irrigation d'autre part, provoquent des accroissements importants de la production d'huile et de protéines. En année moins favorable (1971), la production du tournesol nettement plus faible n'est pas affectée par la date de préparation du sol.

La teneur en huile des graines apparaît comme indépendante des conditions de préparation du sol et du précédent cultural, elle est, en revanche, nettement plus élevée en culture irriguée (45 p. 100 contre 42 p. 100). A cette augmentation de la teneur en huile est associée une diminution du taux de protéines qui dépend, en revanche, du précédent cultural.

La composition en acides aminés du grain demeure relativement stable, mais la teneur en lysine, liée au taux de protides de la graine, dépend des conditions culturales mises en jeu.

I. — INTRODUCTION

Le tournesol, dont la culture connaît aujourd'hui un important essor, a fait l'objet de nombreux travaux de recherches tant agronomiques que physiologiques. Les effets de la fertilisation azotée et de l'irrigation (ROLLIER, 1970 ; COÏC, 1972),

l'influence du peuplement et des conditions d'enracinement de la plante (ROLLIER, 1972) ont été plus particulièrement étudiés.

Nous nous proposons d'aborder ici quelques aspects de la réaction du tournesol à l'action seule ou conjuguée de diverses techniques ou conditions culturales : mode de préparation du sol, irrigation, succession des cultures...

Nous envisagerons à la fois l'effet de ces techniques sur la production quantitative du tournesol et leur incidence sur la qualité de la graine.

La composition des graines de tournesol a fait l'objet d'un certain nombre d'études, notamment en ce qui concerne les protéines. Ainsi, GIRAULT, BAUDET et MOSSÉ (1970) ont montré la composition des différents groupes protéiques (albumines et globulines) et la teneur en lysine des graines. Dans une étude ultérieure, BAUDET *et al.* (1971) ont mis en évidence une relation linéaire entre la teneur en lysine et le taux de protéines brutes des graines, relation que ces auteurs avaient déjà observée dans certaines céréales. D'autre part, COÏC *et al.* (1972) travaillant en pots de végétation ont montré l'effet de l'alimentation azotée apportée à différentes dates (du semis à la floraison, ou poursuivie jusqu'à la récolte) sur le rendement et la qualité de la graine.

Par ailleurs, les travaux de ROBELIN (1967) relatifs à l'action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol indiquent pour l'eau des périodes critiques pour le rendement en grain et en huile de la plante. De même, dans une étude conduite par le C. E. T. I. O. M. (1969-1971) où la variable agronomique était ici la fumure azotée, il a été possible de mettre en évidence une période critique vis-à-vis de l'azote se situant aux mêmes périodes que pour l'eau.

Récemment, DECAU, LENCREROT et PUJOL (1972) ont montré les limites de plasticité d'un tournesol placé au champ dans des conditions de compétitions intra-spécifiques et soumis à des fertilisations azotées différentes.

Si ces divers travaux apportent de précieux éléments de connaissance de la physiologie du tournesol, ils ne permettent pas, pour la plupart, de savoir aussi comment cette culture est susceptible de réagir dans sa production quantitative et qualitative à diverses conditions de croissance et de développement provoquées par l'éventail de techniques culturales mises en jeu dans la pratique agricole.

Afin d'étudier les potentialités des nouvelles variétés de tournesol, d'y adapter les techniques culturales et de rechercher les relations entre celles-ci et la qualité des produits, divers essais ont été entrepris à la Station d'Agronomie de Toulouse, qui ont permis d'étudier l'influence :

— du précédent cultural,
— de la date de préparation du sol,
— de l'irrigation,
— des conditions d'hydromorphie,

sur la physiologie de la plante et ses conséquences sur le rendement et la qualité des produits obtenus.

Les expériences culturales ayant été conduites durant 2 années successives, il a été également possible de noter l'influence des 2 situations climatiques rencontrées.

Après avoir indiqué les conditions expérimentales et les techniques analytiques mises en jeu, nous décrirons tout d'abord le comportement des plantes de la levée à la récolte selon les traitements, puis les productions obtenues.

Nous tenterons ensuite de dégager les mécanismes par lesquels les conditions culturales associées à diverses situations pédoclimatiques exercent leur influence sur le métabolisme de la plante et ainsi sur la qualité des produits.

II. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

A. — *Conditions de culture*

Conditions d'implantation des essais.

Un premier essai cultural (essai principal) a été mis en place en 1970 dans un dispositif destiné à l'étude de la production des principales plantes de grandes cultures introduites dans des assolements différents en culture sèche ou irriguée. Le tournesol (var. *INRA 65-01*) a été implanté soit après sorgho grain (traitements T 10 non irrigué et T 30 irrigué) soit après une association de ray-grass - trèfle violet (traitements T 20 non irrigué et T 40 irrigué). Selon le précédent, la préparation du sol (labour) a été effectuée à des périodes différentes, soit en automne (précédent sorgho), soit au printemps (ray-grass, trèfle violet).

Afin de mieux analyser le rôle joué par la date de labour sur l'implantation et le développement du tournesol, un essai annexe a été mis en place en 1971 sur le même type de sol : après culture de maïs, la reprise des terres a été réalisée à différentes dates, du 23 octobre 1970 (traitement T 11) au 6 avril 1971 (traitement T 21).

Grâce à ces deux essais successifs réalisés sous des conditions climatiques très différentes, quoiqu'après des précédents culturaux différents (maïs et sorgho), il est possible de dégager l'effet particulier des conditions de climat durant la culture. L'action possible du précédent est vraisemblablement très faible, les deux céréales terminant leur cycle durant la même période et l'implantation de la culture nouvelle n'étant réalisée qu'après plusieurs mois d'évolution de la structure du sol et des résidus enfouis.

Dans le second essai, par ailleurs, on a également pu étudier l'influence d'un excès d'eau dû à des conditions d'hydromorphie apparues dans une partie de l'essai. On a pu de ce fait comparer le comportement des plantes semées dans des terres saines (T 21) ou ennoyables (T 31) qui avaient été préparées à la même date (labour du 6 avril 1971).

Traitements et conditions pédoclimatiques.

Les traitements mis en jeu et les conditions pédoclimatiques des essais sont résumés dans le tableau 1.

Fertilisation et irrigation.

Dans les deux essais, toutes les parcelles ont reçu une fertilisation P, K qui correspondait aux exportations des récoltes après chacun des précédents, pour maintenir le niveau de fertilité phosphopotassique des sols. La fertilisation azotée adoptée, apportée au semis, a été de 100 unités en culture sèche et 150 unités en culture irriguée, quel que soit le précédent cultural.

Dans les deux essais, le déficit hydrique a été suivi par l'humidimètre à neutrons. Dans l'essai principal, des arrosages ont été réalisés dès que 35 à 40 p. 100 des réserves utilisables étaient consommées par la culture. Cette technique a permis d'assurer à peu près l'E.T.M. de la culture en apportant 180 mm d'eau au total sur toutes les parcelles irriguées pour l'année climatique 1970.

Conditions d'implantation des tournesols.

Dans les deux essais, on observe une différence manifeste d'état structural du sol en fin de préparation avant le semis. Après labour précoce, l'évolution ultérieure de la structure a permis d'obtenir un lit de semence fin et homogène à la suite de trois reprises superficielles. Après labour de printemps au contraire, la structure reste motteuse et compacte malgré un nombre supérieur de reprises.

De ce fait, dans l'essai annexe, comme dans l'essai principal, le labour tardif n'a pas permis d'obtenir un peuplement aussi important que celui observé après le labour d'automne : ainsi dans l'essai annexe, le nombre de levées s'est avéré beaucoup plus faible (de 20 à 28 p. 100) que celui observé après les préparations les plus favorables (tabl. 3).

Toutefois, il convient de noter ici que dans l'essai principal, dans lequel le but est essentiellement l'étude des potentialités de la culture, après la levée irrégulière signalée plus haut, le tournesol a été semé de nouveau dans des conditions plus favorables d'où un peuplement plus homogène quel que soit le labour (tabl. 3).

TABLEAU I

Principales conditions pédoclimatiques et culturales des deux essais entrepris

	Précédent	Traitement	Date Labour	Conditions climatiques durant la culture			Conditions pédologiques (composition granulométrique du sol) (p. 1 000 de terre)	
				Période	EPT	Pluies		
Essai principal (1970)	*Sorgho*	T 10 non irrigué	25-10-69	avril (3e décade)	25,3	20,5	Argile	232
				mai	96,9	69,5	Limon fin	267
				juin	167,6	46,2	Sable fin	315
		T 30 irrigué					Sable grossier .	145
	Ray-grass	T 20 non irrigué	2-4-70	juillet	179,5	20,0	Calcaire	—
				août	150,6	34,5	Mat. organiques	14
		T 40 irrigué		septembre (1re décade)	38,6	1,5		
				Total	658,5	192,2		
Essai annexe (1971)	*Maïs*	T * 11 *a*	23-10-70	avril (3e décade)	31,5	30,5	Argile	270
		T * 11 *b* non irrigué	4-11-70	mai	105,5	109,0	Limon fin	220
				juin	149,7	132,5	Limon grossier	111
		T 21 non irrigué	6-4-71	juillet	152,5	48,5	Sable fin	142
		T 31 (1) non irrigué	6-4-71	août	134,8	36,1	Sable grossier .	218
				septembre (1re décade)	29,8	15,0	Calcaire	—
				Total	603,8	371,6	Mat. organiques	18,8

* répétition
(1) milieu hydromorphe

B. — *Observations et mesures*

Dans l'essai principal, on a noté :

— la colonisation du sol par les racines grâce à l'examen de profils culturaux à la récolte,
— la croissance des plantes et leur aspect morphologique selon les traitements,
— la production quantitative et qualitative de grains à la récolte (production de matière sèche totale ; rendement en grains, tiges et feuilles, capitules ; taux d'humidité des différents organes).

Dans l'essai annexe, outre les observations et mesures précédentes, on a pu suivre :

— l'implantation du système racinaire grâce à 4 examens successifs du profil cultural durant la phase de croissance des plantes,

— l'évolution de la taille des plantes et la formation des niveaux successifs de feuilles (prélèvements échelonnés de la levée des cultures à la récolte),

— la dynamique des synthèses durant le cycle de végétation : répartition des matières sèches entre les organes aux stades BF 3, après floraison et à la récolte.

C. — *Techniques analytiques*

Les différents organes de la plante (tiges, feuilles, réceptacle, graines) ont fait l'objet d'analyses minérales lors des prélèvements en cours de culture et à la récolte (dosage de l'azote total, du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium).

Dans le grain, on a déterminé en outre :

— la teneur en huile, par extraction à l'hexane,

— la composition en acides aminés des protides par l'analyse automatique « Technicon ».

III. — RÉSULTATS

A. — *Enracinement*

Les conditions de préparation du sol, l'irrigation, et les conditions hydriques du milieu (tendance à l'hydromorphie) agissent sur la colonisation du terrain par les racines.

L'étude des profils culturaux en cours ou en fin de culture permet de noter les faits suivants :

Dans l'essai principal.

En culture non irriguée, le tournesol cultivé après le précédent sorgho et labour d'automne colonise intimement par son feutrage racinaire les couches superficielles du sol ; après ray-grass - trèfle violet et labour de printemps, dans la couche arable, les racines ne pénètrent pas à l'intérieur des mottes mais forment seulement un feutrage superficiel ; en revanche, le système racinaire se développe davantage en profondeur.

En milieu irrigué, l'enracinement demeure tout particulièrement superficiel après sorgho ; après ray-grass - trèfle violet au contraire, un très fin chevelu se développe dans le sous-sol.

Dans l'essai annexe.

Après labour d'automne, la colonisation du milieu par les racines progresse plus rapidement qu'après labour de printemps. Cependant, le bol racinaire se développe et se ramifie abondamment dans la couche superficielle quel que soit le type de labour, mais plus particulièrement après préparation d'automne.

Lorsque le sol est en condition hydromorphe, le bol racinaire demeure plus superficiel et la colonisation du milieu reste moins importante tandis qu'apparaissent des zones de pseudogley dans les profils. Une description plus détaillée des profils culturaux a été donnée par ailleurs (Marty, Hilaire, Cabelguenne, 1970 ; Cousin, 1971).

B. — *Croissance et développement*

Comme pour les racines, la croissance des parties aériennes du tournesol dépend du précédent cultural, de l'irrigation, des conditions de travail du sol et de l'hydromorphie.

a) *Rythme de croissance et de développement.*

Dans l'essai principal.

En culture sèche, le tournesol cultivé après précédent sorgho (et labour d'automne) manifeste une croissance normale jusqu'au début de la floraison, puis il se produit un arrêt de la végétation suivi d'une maturation accélérée des grains. Après le précédent ray-grass - trèfle violet (et labour de printemps), le tournesol traverse une période difficile, de l'implantation jusqu'à l'apparition du bouton floral (retard de croissance par rapport au tournesol après sorgho). A partir de cette date, un important départ de végétation se manifeste. Le développement végétatif des plantes s'accélère et atteint presque celui des cultures après sorgho.

En culture irriguée, les mêmes différences de rythmes de croissance et de développement se manifestent, selon le précédent. Après sorgho, les plantes sont, à la floraison, plus hautes et plus vertes qu'en culture sèche, tandis qu'après ray-grass, le départ tardif en végétation a été plus manifeste.

Dans l'essai annexe.

La croissance et le développement des plantes se trouvent retardés après labour tardif. Des mesures régulières de croissance des tiges montrent en outre (fig. 1) que la hauteur moyenne des plantes à la récolte demeure inférieure après labour de printemps.

Des prélèvements en cours de culture et des mesures du taux de matière sèche des plantes, confirment le retard physiologique des cultures après labour tardif (tabl. 2).

TABLEAU 2

Évolution du taux de matière sèche des différents organes ou groupes d'organes
(MS p. 100 MF)

Organes	Tiges + feuilles			Capitules		Grains	
Dates de prélèvement	26-6	27-7	13-9	27-7	13-9	27-7	13-9
T 11 *a*	9,7	17,4	42,2	11,1	51,6	34,4	84,0
T 11 *b*	9,9	17,0	40,6	12,2	53,6	32,5	82,7
T 21	12,6	17,0	27,8	11,5	21,1	24,1	64,5
T 31	13,6	16,8	29,8	10,7	19,0	26,3	65,9

Dans l'essai principal, en conditions sèches, compte tenu du climat de l'année, ce phénomène est beaucoup moins marqué. En revanche, l'effet de la date de labour, associé à un éventuel effet spécifique du précédent, se manifeste très nettement lorsque la culture a été irriguée : taux de matière sèche du grain à la récolte de 79 et

76,9 p. 100 en culture sèche, de 79 et 66,8 p. 100 en culture irriguée, après sorgho et ray-grass respectivement.

En ce qui concerne l'hydromorphie, les données du tableau 3 et de la figure 1 tendent à montrer l'absence d'effet particulier, dans les conditions de l'essai, sur la croissance de la plante.

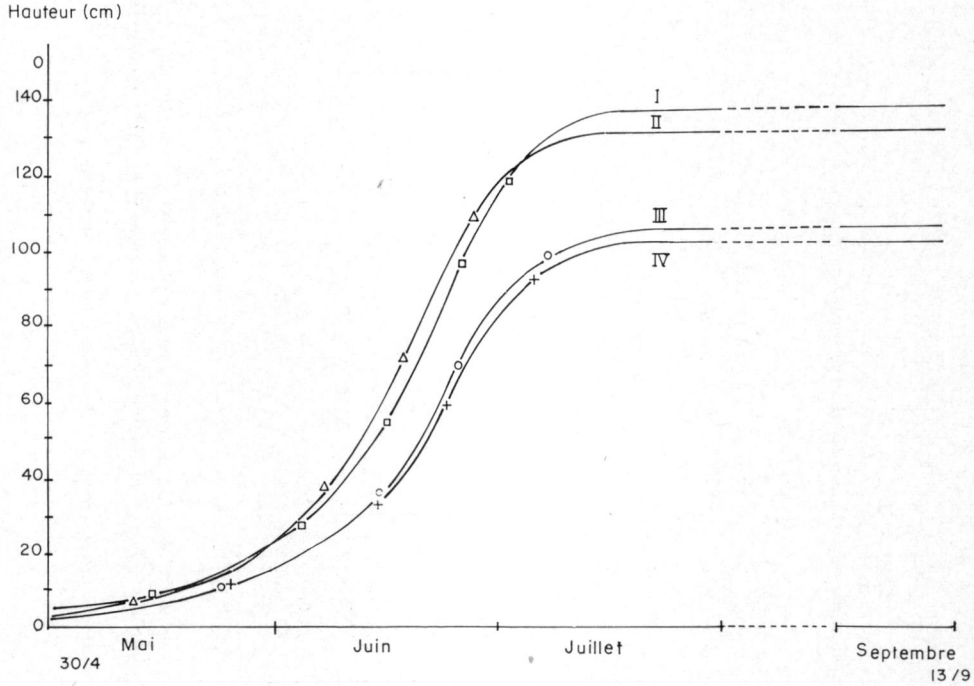


FIG. 1. — *Croissance du tournesol en fonction des modalités de travail du sol*

I (□)	T 11 A	labour d'automne	23/10
II (△)	T 11 B	—	4/11
III (○)	T 21	labour de printemps	6/4
IV (+)	T 31	—	—

b) *Fructification des tournesols.*

L'examen comparé de la fructification des tournesols suivant les différentes conditions expérimentales étudiées apparaît comme difficile du fait des différences de peuplement observées (tabl. 3). Afin de tenter de déterminer la part des différences qui résulte des écarts de peuplement et celle due aux traitements mis en jeu, nous avons calculé le nombre de grains par capitule que l'on devrait obtenir si tous les peuplements étaient les mêmes. Cette fructification théorique a été établie en s'appuyant sur les observations et à partir des hypothèses suivantes :

— de nombreuses expériences montrent que le rendement en grains demeure sensiblement le même dans une très large gamme de peuplement (ROBELIN, 1972 ; PUECH, communication personnelle) ;

— le poids du grain apparaît comme beaucoup moins variable que le nombre de grains par capitule tandis que diffèrent les traitements et les peuplements (tabl. 3).

TABLEAU 3

Conditions culturales et composantes du rendement

Traitement		Précédents et travail du sol	Irrigation	Nombre de pieds/ha	Nombre de grains/cap. (données exp.)	Nombre de grains/cap. calculé (1)	Effets peuplement (2)	Nombre de grains/cap. calculé (3)	Poids de 1 000 grains (g)
Essai principal (1970)	T 10	Sorgho (labour d'automne)	non irrigué	58 000	**(4) [1 445] *(4)	1 445	0	* [1 445]	45,7
	T 30		irrigué	75 500	[1 510]	1 110	+ 335	* [1 845] *	40,3
	T 20	Ray-grass-Trèfle violet (labour de printemps)	non irrigué	69 000	[945]	1 215	+ 230	* [1 175]	42,6
	T 40		irrigué	70 000	[1 125]	1 197	+ 248	[1 373]	44,3
Essai annexe (1971)	T 11 *a*	Maïs (labour d'automne)	non irrigué	91 000	[921]	921	+ 524	[1 181]	36,5
	T 11 *b*			85 000	[623]	986	+ 459	[1 082]	40,7
	T 21	Maïs (labour de printemps)		65 000	* [810]	1 289	+ 156	* [966]	42,6 [*(4)]
	T 31 (hydromorphe)			68 000	[646]	1 233	+ 212	[858]	34,2

(1) Avec hypothèse d'un effet peuplement seul.
(2) ΔN = Nombre de grains par capitule du traitement T 10 — Nombre de grains calculé de chaque traitement.
(3) Nombre de grains par capitule, effet du peuplement déduit (nombre de grains par capitule observé + nombre de grains « effet peuplement »).
(4) Différences significatives * ou hautement significatives **.

Si l'on admet donc en première approximation que le rendement et le poids du grain demeurent constants, quel que soit le peuplement, nombre de grains par capitule et nombre de pieds par hectare deviennent inversement proportionnels. Il est dès lors possible en prenant pour base les données du traitement T 10 par exemple, de calculer le nombre de grains théoriques par capitule que l'on peut attendre du fait des différences de peuplement et la part relative due à l'effet peuplement d'une part, au traitement d'autre part.

Les données ainsi obtenues montrent que la fertilité du capitule a varié selon l'irrigation, le précédent cultural et les conditions pédoclimatiques.

L'irrigation exerce, quel que soit le précédent, un effet favorable, mais la fructification demeure aussi sous l'étroite dépendance du précédent cultural. La comparaison des résultats obtenus dans les deux essais fait aussi apparaître des écarts liés aux différences de conditions climatiques (comparaison T 10-T 11). Un printemps froid et humide (tabl. 1) a affecté l'implantation de la culture en 1971 (T 11) et aussi son développement ultérieur, alors qu'en 1970, les conditions ont été particulièrement favorables. En 1971, les phénomènes d'hydromorphie sont venus surajouter leur effet sur la fructification de la plante : le nombre de grains par capitule atteint dans ces conditions son niveau le plus bas.

En revanche, les dates de labour n'exercent pas, dans les conditions de l'essai, d'action nette sur la fructification.

Autre composante du rendement, le poids du grain présente des fluctuations qui n'apparaissent pas pour la plupart directement liées aux conditions culturales ; seul l'effet des conditions d'hydromorphie affecte significativement le grossissement du grain.

Par ces effets sur les phénomènes de croissance et de développement, les techniques mises en jeu et les conditions de milieu rencontrées déterminent la production quantitative et qualitative de la culture.

C. — *Production de matière sèche*

Les données du tableau 4 montrent que, pour des conditions de labour comparables (T 10, T 11), la production de matière sèche a été significativement plus élevée en 1970 qu'en 1971. Bien que les précédents soient ici de nature différente (Sorgho et Maïs), cette condition culturale ne saurait intervenir, comme il a été dit plus haut, de façon notable dans les écarts de production observés ; ceux-ci résultent donc essentiellement de différences des conditions climatiques. En revanche, la comparaison des résultats d'une même année climatique (1970) montre que le précédent ray-grass - trèfle violet associé à un labour tardif entraîne, en culture non irriguée, une diminution de la production totale de matière sèche (par rapport au précédent sorgho et labour d'automne). L'ennoyage du sol diminue également la production de matière sèche totale.

Le rendement en grain significativement plus élevé dans l'essai principal, et tout particulièrement en culture irriguée, s'avère ici plus faible après prairie. Les données de l'essai annexe montrent toutefois qu'après labour tardif le rendement ne diffère pas, grâce au phénomène de compensation évoqué plus haut (tabl. 2), de celui obtenu après labour d'automne, tandis que, comme pour la matière sèche totale, les phénomènes d'hydromorphie provoquent une chute significative de rendement (tabl. 4).

L'écart des productions de grain entre 1970 et 1971 s'accompagne d'une diminution du pourcentage de grain dans la masse totale de matière sèche produite. En effet, tandis qu'en 1970, la masse de grain formée représente près de 50 p. 100 de l'ensemble de matière sèche élaborée par la plante, elle n'est plus que de 30 à 40 p. 100 en 1971. Les conditions climatiques en cours de culture paraissent avoir joué un rôle considérable sur la fructification du tournesol et le rendement de cette culture.

TABLEAU 4

Rendements et teneurs en huile et en protéines du tournesol selon les conditions pédoclimatiques et culturales

Précédent	Essai principal (1970)				Essai annexe (1971)		
	Sorgho		Ray-grass		Maïs		
Traitement	T 10 non irrigué	T 30 irrigué	T 20 non irrigué	T 40 irrigué	T 11 non irrigué	T 21 non irrigué	T 31 (1) non irrigué
Peuplement (pieds /ha)	58 000	75 500	69 000	70 000	88 000	65 000	68 000
Production totale de matière sèche (q/ha)	73,5	86,2	61,1	86,5	58	51,8	42,8
	** (3)		** (3)		*	(2)	
Rendement en grain (q/ha)	34,4	46,9	27,1	34,9	21,9	21,7	15,4
	**		**		** (5)		* (4)
					**		
Teneur en huile (% de grain sec)	41,8	44,8	41,8	44,7	45,9	43,8	39,1
	*		*		**		*
Teneur en protéines (% de grain sec)	17,1	15,3	20,7	19,1	17,8	15,3	15,5
	**		**			*	
					**		
Rendement en huile (q/ha)	14,6	21,5	11,3	15,6	10,1	9,5	6,0
	**		**			*	
					**		
Rendement en protéines (q/ha)	5,4	7,2	5,6	6,7	3,9	3,3	2,4
	**		**			*	

(1) Milieu hydromorphe.
(2) Effet de l'année climatique pour même type de labour (* significatif; ** hautement significatif).
(3) Effet de l'irrigation (* significatif ; ** hautement significatif).
(4) Influence de l'hydromorphie (* significatif ; ** hautement significatif).
(5) Effet du précédent cultural (* significatif ; ** hautement significatif).

D. — *Teneurs et rendements en huile et en protéines*

Teneurs en huile.

Les teneurs de la graine en lipides (tabl. 4) diffèrent selon l'année climatique, l'irrigation et les conditions de sol. En culture sèche, tandis qu'en 1970, les teneurs demeurent voisines de 42 p. 100 du poids de la graine, quels que soient le précédent et la préparation culturale, en 1971, les teneurs ont atteint dans des conditions culturales comparables, 44 et 46 p. 100. Une lipidogenèse plus intense est venue, en partie, compenser un rendement plus faible.

Cependant, les résultats de 1970 montrent que l'irrigation augmente significativement à la fois le rendement en grain et la teneur en huile de la plante (tabl. 4). En conditions hydromorphes, par contre, nous voyons la chute du rendement s'accompagner d'une diminution significative de la teneur en huile.

Teneurs en protéines.

Contrairement aux faits couramment observés (ROLLIER, 1971 ; COÏC *et al.*, 1972), les teneurs en protides présentent ici des variations le plus souvent indépendantes de celles des teneurs en lipides.

Dans l'essai principal, en culture sèche comme en culture irriguée, le taux de protéines est de près de 20 p. 100 plus grand après ray-grass - trèfle violet qu'après sorgho, malgré l'absence de variations de la teneur en huile.

Dans l'essai annexe, apparaît l'influence manifeste de la date de labour : la teneur du grain en protéines est de près de 15 p. 100 inférieure après labour de printemps. Les phénomènes d'hydromorphie, en revanche, ne viennent pas accentuer cette différence.

Rendement en huile et en protéines.

Comme les teneurs en lipides et les rendements en grain, les productions d'huile diffèrent significativement avec l'année climatique (tabl. 4).

En culture sèche et avec le précédent ray-grass - trèfle violet d'une part, avec les conditions d'hydromorphie d'autre part, la production d'huile diminue très significativement.

L'ennoyage affecte de façon semblable la production de protéines mais le précédent et la date de labour ne provoquent pas d'écarts significatifs. Par contre, l'irrigation provoque une augmentation très significative de la production d'huile et un accroissement moindre du rendement en protéines.

E. — *Composition en acides aminés des protides de la graine*

L'analyse des acides aminés (tabl. 5) permet d'observer la grande stabilité de composition protéique des grains obtenus dans des conditions pédoclimatiques et culturales très diverses.

Toutefois, on note des différences significatives des taux d'acide glutamique, de proline et lysine. La teneur en acide glutamique est plus élevée après ray-grass-trèfle violet (essai principal) ou après labour d'automne (essai annexe). Ces variations sont de même sens que les écarts observés dans les taux de protides de la graine. La teneur en proline, comme celle de l'acide glutamique, est plus faible après labour tardif (essai annexe). Le taux de lysine est inférieur dans les graines obtenues après culture de ray-grass - trèfle violet à celui des graines après céréales. Cette dilution

de la lysine dans les protides, tandis que le taux de protéines de la graine augmente, paraît être un phénomène général, tant dans le tournesol (GIRAULT, MOSSÉ, BAUDET, 1970 ; BAUDET, LECLERCQ, MOSSÉ, 1971) que dans les céréales (DECAU et PUJOL, 1969).

TABLEAU 5

Composition en acides aminés des protéines de la graine
(acides aminés p. 100 d'acides aminés totaux)
à la récolte selon les conditions pédoclimatiques et culturales

Précédent	Ray-grass (1970)		Sorgho (1970)		Maïs (1971)		
Traitement	T 40 irrigué	T 20 non irrigué	T 30 irrigué	T 10 non irrigué	T 11 non irrigué	T 21 non irrigué	T 31 non irrigué
Acide aspartique ..	9,27	9,32	9,38	9,28	9,52	9,32	8,20
Acide glutamique..	22,01	22,68	21,06	21,76	20,79	20,15	18,24
Sérine.....	4,36	4,21	4,12	4,13	4,14	4,21	4,04
Thréonine	3,82	3,56	3,73	3,65	3,89	3,91	3,74
Glycine	5,90	5,48	5,95	5,71	6,06	6,12	6,46
Alanine	4,63	4,80	4,94	4,47	4,52	4,57	4,46
Valine	4,50	4,78	4,80	4,66	4,64	4,77	4,09
Cystine	3,27	3,35	3,16	3,40	3,28	3,91	5,59
Méthionine	1,68	1,48	1,86	1,04	2,18	2,85	2,80
Leucine	7,37	7,29	7,34	7,39	7,39	7,75	8,25
Isoleucine	4,30	4,40	4,45	4,27	4,21	4,37	4,52
Tyrosine	2,83	2,83	2,98	2,76	2,59	3,04	2,86
Phénylalanine.....	4,72	4,80	4,94	4,92	5,14	4,90	5,83
Proline	5,29	5,77	5,20	5,73	4,67	4,35	4,50
Lysine	3,89	3,42	4,37	4,08	4,37	4,69	4,10
Histidine	2,61	2,63	2,72	2,89	2,74	2,91	2,72
Arginine	9,34	9,41	8,99	9,67	9,05	8,50	9,25

Sous l'effet de l'irrigation, de même, le taux de lysine des protéines augmente tandis que diminue la teneur en protides de la graine. Nous retrouvons ici encore les mêmes variations opposées du taux de lysine et de la teneur en protéines que celles notées sous l'effet du précédent cultural.

IV. — DISCUSSION

A la lumière des observations morphologiques et physiologiques réalisées en cours de culture, et grâce à la détermination de la composition minérale des plantes, il est possible d'étudier les mécanismes par lesquels s'exerce sur le tournesol l'influence des conditions pédoclimatiques et culturales.

Afin de faciliter cette approche, nous avons regroupé dans la figure 2 ci-dessous les principaux résultats relatifs aux rendements quantitatifs et à la qualité de la graine.

A. — *Effet de la date de labour*

Dans les conditions climatiques de l'essai annexe qui seul permet l'étude de l'effet spécifique de cette technique, l'influence du travail du sol se manifeste simultanément sur la teneur en huile et en protéines de la graine (fig. 2). La teneur en huile plus faible, observée après labour de printemps, résulterait du retard physiologique de la plante que traduisent les données de la figure 1 et du tableau 3 ; ce retard peut être estimé à la récolte à près de 10 jours. Or, quoique la formation de l'huile dans les graines oléagineuses soit un processus rapide (EYRE, 1931 ; MAZLIAK, 1968), la lipidogenèse, après cette phase accélérée, se poursuit à un rythme plus lent (0,4 à 0,5 p. 100 de matière sèche du grain/jour) jusqu'à la maturité de la graine (ROBELIN, 1967).

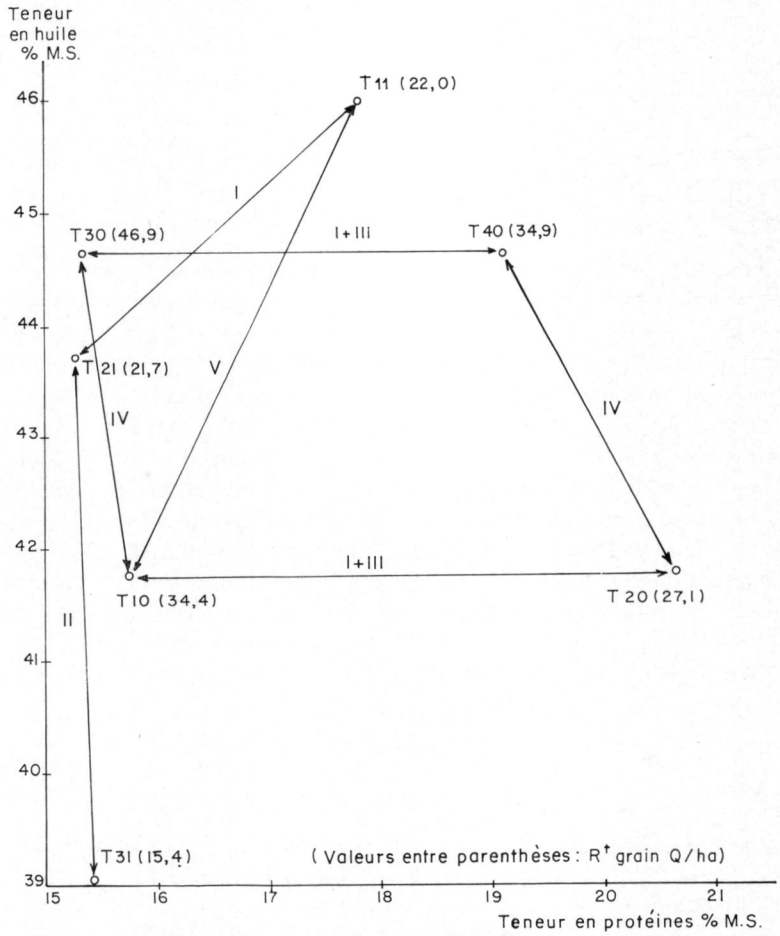


FIG. 2. — *Rendements, teneurs en huile et en protéines des graines de tournesol en fonction des conditions pédoclimatiques et culturales*

I. Effet date de labour
II. Influence des conditions d'hydromorphie
III. Effet du précédent cultural
IV. Influence de l'irrigation
V. Influence du climat

Mais, si on peut expliquer par l'effet direct du retard physiologique sur la plante la plus faible teneur en huile après labour tardif, un tel phénomène ne permet pas de rendre compte des écarts entre les taux de protéines observés (fig. 2).

Le taux de protéines dans la graine, tout comme la teneur en huile, augmente au cours du temps (tabl. 6).

TABLEAU 6

Taux de protéines de la graine
(p. 100 de matière sèche)

Traitement		T 11	T 21	T 31
Stade physiologique (nombre de jours après la levée)	Fructification (87 jours)	15,3	13,5	12,7
	Récolte (138 jours)	18,0	14,4	15,9

Cependant, on peut noter que la teneur en protéines est déjà plus élevée avec le labour d'automne, 15 jours après la fécondation, que la teneur à la récolte après labour tardif. L'écart entre les taux de protéines à la récolte ne peut donc s'expliquer par le seul décalage physiologique entre les traitements. La différence observée semble résulter principalement de l'influence des traitements labour et des conditions pédoclimatiques sur l'absorption de l'azote par les plantes (tabl. 7). En effet, à la fin du printemps lorsque les plantes ont atteint le stade BF 3, elles n'ont absorbé qu'*un tiers* environ de l'azote de la fumure en T 11 ; à la même date, les plantes cultivées après labour tardif (T 21 et T 31) n'en ont absorbé qu'*un dixième* seulement. Durant cette phase végétative, l'excès des pluies sur l'évapotranspiration a provoqué un drainage notable et de ce fait, un entraînement des nitrates vers la profondeur. Ces phénomènes, joints au retard physiologique manifeste observé après labour de printemps, expliquent les différences d'alimentation azotée observée (teneur moyenne en azote de la plante entière au stade BF 3 : 1,64 et 1,28 p. 100 MS pour T 11 et T 21 respectivement).

TABLEAU 7

Absorption de l'azote (kg/ha) *par le tournesol placé dans diverses conditions de culture*

Traitement	Date de prélèvement		
	26-6	27-7	13-9
T 11	34,5	76	89
T 21	14	42	76
T 31	8	39	58

Par la suite, la quantité d'azote absorbé augmente considérablement en T 11 si bien que subsiste, durant une longue phase du cycle de la plante, un important décalage entre les parcelles diversement travaillées ; cependant, au cours de la formation de la graine, celui-ci tend à décroître du fait d'une active absorption tardive chez les plantes présentant un retard physiologique (tabl. 7).

B. — *Influence des conditions d'hydromorphie*

L'hydromorphie, en limitant l'enracinement de la plante, agit sur l'absorption des éléments minéraux et notamment réduit l'absorption d'azote (tabl. 7). Cependant, celle-ci n'affecte pas la teneur en protéines de la graine du fait d'une importante réduction concomitante du rendement. La teneur en huile, en revanche, présente une chute particulièrement nette (fig. 2) mais les résultats obtenus ne permettent pas d'expliquer parfaitement les conséquences de l'ennoyage sur la lipidogenèse. Une étude plus poussée des mécanismes en cause serait, à ce niveau, nécessaire.

C. — *Effet du précédent cultural et de la date de labour*

Les résultats de l'essai principal mettent en évidence l'influence du précédent cultural. Cet effet peut s'exercer à la fois par l'intermédiaire des différences de travail du sol et par un effet direct de la culture antérieure.

L'effet travail du sol, en partie réduit après levée inégale des plantes (cf. conditions des essais) grâce à un nouvel ensemencement, se manifeste cependant par l'intermédiaire d'un enracinement différent et il s'ensuit une absorption différente des éléments minéraux, notamment des cations et des phosphates : à la colonisation importante de l'horizon de surface après labour d'automne correspond une absorption dominante du potassium ; au développement plus profond du bol racinaire, après labour de printemps, est associée une absorption beaucoup plus faible de cet élément et dans une moindre mesure du phosphore. Les données du tableau 8 illustrent très nettement ce phénomène.

TABLEAU 8

Teneur des organes végétatifs du tournesol en leurs principaux éléments minéraux

Précédent	Sorgho		Ray-grass-Trèfle violet	
Traitement	T 10 non irrigué	T 30 irrigué	T 20 non irrigué	T 40 irrigué
N (tiges + feuilles)	0,54	0,67	1,03	0,70
N (capitules)	1,00	1,07	1,34	1,20
P (tiges + feuilles)	0,10	0,10	0,06	0,06
P (capitules))	0,12	0,21	0,07	0,07
K (tiges + feuilles)	3,84	3,84	1,36	2,36
K (capitules)	6,24	6,93	1,23	2,78
Ca (tiges + feuilles)	2,89	3,20	2,27	2,29
Ca (capitules)	1,57	1,74	2,56	2,27

Les teneurs des sols en phosphore et potassium assimilables présentent un gradient décroissant vers la profondeur et l'alimentation minérale de la plante après labour tardif ayant lieu principalement à partir du sous-sol, les tournesols cultivés dans ces conditions auraient souffert du manque de disponibilité de ces éléments d'où un rendement plus faible après ray-grass - trèfle violet qu'après sorgho (fig. 2). Ici encore une étude complémentaire des besoins en éléments minéraux du tournesol et de leur rôle dans la production s'avère nécessaire.

L'effet spécifique du précédent apparaît nettement quand on considère non plus l'absorption des cations et du phosphore, mais celle de l'azote. Tandis que l'absorption de P et K est plus faible après ray-grass - trèfle violet, l'absorption d'azote est, en revanche, plus grande (130 kg/ha contre 110 kg/ha après sorgho) d'où des teneurs en azote des organes très différentes (tabl. 8). Ces écarts sont vraisemblablement liés à un effet spécifique azote dû au précédent ray-grass-trèfle violet. En effet, cette association laisse au sol d'importants résidus organiques riches en azote minéralisable qui ont pu largement contribuer à l'alimentation azotée du tournesol, plus particulièrement dans la période qui précède la floraison et durant les phases ultérieures du développement de la plante.

D. — *Influence de l'irrigation*

Comme le montrent les résultats obtenus, l'irrigation favorise notablement la photosynthèse nette du tournesol ; le rendement en grains est significativement plus élevé qu'en culture sèche. Quel que soit le précédent, le métabolisme lipidique apparaît nettement plus intense lorsque le tournesol est en culture irriguée.

Ces effets de l'irrigation peuvent être rapprochés de phénomènes similaires observés chez le maïs : au déplacement de l'équilibre oléoprotéique de la graine du tournesol sous l'effet de l'irrigation correspond un déplacement de l'équilibre glucido-protéique du grain de maïs (Decau et Pujol, 1972). Bien que le mécanisme de ces phénomènes n'apparaisse pas de façon claire, il semble, d'après les observations effectuées sur maïs, que l'irrigation agisse notamment sur le transfert relatif des métabolites qui participent à la synthèse des réserves ternaires et des protides.

L'appauvrissement en protéines de la graine des tournesols irrigués se trouve compensé, comme nous l'avons vu plus haut, par un enrichissement plus grand des matières azotées en lysine d'où des teneurs des grains en cet acide aminé sensiblement égales quelle que soit l'alimentation hydrique.

E. — *Influence du climat*

L'influence des conditions climatiques apparaît nettement lorsque l'on compare les résultats obtenus dans l'essai principal et dans l'essai annexe, dans les traitements comportant l'un et l'autre un précédent céréales (sorgho ou maïs) et labour d'automne : rendement en grains plus élevé en 1970 qu'en 1971, mais taux d'huile inférieur dans ces conditions (fig. 2).

L'examen des composantes du rendement met ici tout d'abord en évidence, entre les 2 traitements, des différences considérables de peuplement :

$$\Delta P = 30\,000 \qquad \frac{\Delta P}{P} = 0{,}52.$$

Mais il ressort de nombreuses observations culturales (ROLLIER, 1970 ; PUECH [1]) que le rendement en grain du tournesol demeure sensiblement constant dans une large gamme de peuplement. L'écart de production observé apparaît donc comme imputable, pour sa plus large part, à un taux de fructification différent selon l'année climatique (tabl. 2).

L'existence de cet effet des conditions climatiques, que confirme d'ailleurs la comparaison des productions obtenues en culture sèche ou irriguée, rend incertain l'intérêt du rapprochement de l'effet global précédent (1970) et de l'effet labour (1971), rapprochement que l'on serait tenté de faire dans le but de déterminer la part relative de l'effet spécifique du précédent et de celle du travail du sol. En effet, la part des écarts observés entre les traitements T 10-T 30 d'une part, et T 20-T 40 d'autre part, et attribuable à une action labour peut différer de l'effet travail du sol (1971) par le biais d'interactions techniques de labour — climat, difficiles à mesurer dans nos conditions expérimentales.

V. — CONCLUSION

Sous l'effet de diverses conditions culturales (nature du précédent, date de labour, irrigation) et pédoclimatiques qui modifient largement les conditions de sol, mais non directement le niveau des éléments minéraux potentiellement disponibles, nous avons pu observer d'amples variations des rendements du tournesol et de l'équilibre oléoprotéique de sa graine. Simultanément, la composition en acides aminés du grain demeure relativement stable.

Les techniques culturales apparaissent ainsi comme un puissant moyen d'action sur la production quantitative et qualitative du tournesol. Cette action s'exerce au niveau de la germination, de l'implantation du système racinaire qui joue un rôle principal, de l'absorption des éléments minéraux, de la croissance et du développement des parties aériennes.

Ces résultats suggèrent la possibilité de voir contrebalancé l'effet défavorable de certaines techniques culturales, telles qu'un labour tardif, en adaptant les modalités des interventions ultérieures aux situations rencontrées : la manifestation de phénomènes de compensation dans la croissance, le développement et la production du tournesol (essai 1971), la colonisation variable des milieux par les racines selon l'année climatique, après un même type de travail du sol, suggèrent la possibilité de compenser les effets d'une préparation culturale défavorable par une meilleure maîtrise des conditions d'alimentations hydrique et minérale de la plante.

Dans ce but, une connaissance plus approfondie de l'écologie et de la physiologie du tournesol demeure nécessaire.

Reçu pour publication en décembre 1972.

(1) Communication personnelle.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF THE PLANTING AND GROWTH CONDITIONS OF THE SUNFLOWER WITH REGARD TO QUANTITATIVE YIELD AND OLEOPROTEIN COMPOSITION OF ITS SEED

The joint influence of various pedoclimatic and cultural conditions on the growth of a sunflower (var. *I. N. R. A. 65-01*) and their impact on the lipidic and protein yields was investigated by conducting two tests over two different climatic years, as follows :

— the main test, carried out in 1970, involved the following cultural variables : previous crop (either sorghum or ray-grass + red clover), ploughing time (either in the autumn or spring), water feed (irrigated and unirrigated crops) ;

— an ancillary test, carried out in 1971 on the same type of soil, enabled to study the influence of ploughing time and hydromorphic conditions.

In a climatically-propitious year (1970), conductive to high yields, early ploughing, in conjunction with, on the one hand, previous sorghum crop and, on the other, irrigation, substantially increased oil and protein yields. In 1971, when climatic conditions were not as good, tillage time did not affect the distinctly lower sunflower yield.

The seed-oil content is apparently unrelated to tillage conditions and previous crop but rises markedly in wet crops (45 p. 100 versus 42 p. 100). Such increase correlates with a drop of the protein content which, conversely, depends on the previous crop.

The amino-acid composition of the grain varies but little, although the lysine content, in conjunction with that of the seed's proteins, depends on the cultural conditions involved.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR STUDIE ÜBER DIE AUSWIRKUNG DER EINPLANZUNGS- UND ENTWICKELUNGSBEDINGUNGEN DER SONNENBLUME AUF IHRE QUANTITATIVE ERZEUGUNG UND DIE ÖLPROTEINISCHE ZUSAMMENSETZUNG IHRES SAMENS

Der gemeinsame Einfluss der verschiedenen Bodenklim- und Anbaubedingungen auf das Wachstum und die Entwicklung einer Sonnenblume (Sorte : *INRA 65-01*) und ihrer Konsequenzen auf die Lipoid- und Proteinerzeugung wurde anhand zwei Versuchen geprüft, die während zwei verschiedenen klimatischen Jahren durchgeführt wurden :

— ein haupter im Jahre 1970 durchgeführter Versuch, in welchem die folgenden Anbauveränderungen auftrate : zunächst (Sorghohirse oder Raygras + Rokteee), Datum der Feldbestellung (Feldbestellung im Herbst oder im Frühling), Wasserstoffversorgung (bewässerte oder unbewässerte Kultur).

— ein im Jahre 1971 auf demselben Bodentyp aufgestellter Nebenversuch ermöglichte den Einfluss des Datums der Feldbestellung und den der hydromorphen Bedingungen zu untersuchen.

Im klimatisch günstigen Jahr (1970), das zu bedeutenden Erträgen geführt hat, haben die mit der vorausgegangenen Sorghohirse gebundene frühzeitige Feldbestellung einerseits, und die Bewässerung anderseits bedeutende Öl- und Proteinezunahmen hervorgerufen. Innerhalb eines weniger günstigen Jahres (1971) wird die deutlich schwächere Sonnenblumenerzeugung durch das Datum der Bodensvorbereitung nicht beeinflusst.

Der Ölgehalt der Samen zeigt sich als unabhängig von den Bodensvorbereitungsbedingungen und des voherigen Anbaus ; er ist dagegen deutlich höher in bewässerten Kulturen (45 p. 100 gegen 42 p. 100). Mit dieser Erhöhung des Ölgehaltes ist eine Herabstzung des Proteinsatzes verbunden, welcher dagegen von dem vorherigen Anbau abhängig ist.

Die Zusammensetzung des Samens mit Aminosäuren bleibt verhältnismässig beständig, aber der an den Protidensatz des Samens gebundene Lysingehalt ist von den ein gesetzten anbaubedingungen abhängig.

РЕЗЮМЕ

К изучению эффекта условий внедрения и развития культуры подсолнечника на его количественную продукцию и маслянисто-белковый состав семян.

П. ЛЕНКРЕРО, Ж. ДЕКО, Б. КОШАР, Ж. Р. МАРТЕН, Б. ПЮЖОЛЬ.

Совместное влияние различных педологическо-климатических условий и условий культуры на произрастание и развитие подсолнечника (сорт И.Н.Р.А. 65-01), и последствия этого влияния на маслянистую и белковую продукцию растения изучались в двух опытах проведенных в два разные в климатическом отношении года :

— главный опыт поставленный в 1970, при следующих переменных условиях культуры : предшественник (сорго, или рай-грасс + красный клевер), эпоха вспашки (осенняя, или весенняя), водный режим (с орошением, или без орошения);

— дополнительный опыт поставленный в 1971, на почве того-же типа, и позволивший изучить влияние эпохи вспашки и гидроморфных условий.

В году климатически благоприятном (1970), давшем крупные урожаи, ранняя вспашка, после прешествовавшей культуры сорго, и применение орошения, вызвали крупное увеличение продукции масла и белков. В менее благоприятном году, эпоха подготовки почвы не отразилась на, и без того, более слабой продукции подсолнечника.

Содержание масла в семенах не зависит от условий подготовки почвы и от предшественника, но оно, напротив, сильно повышается в орошаемой культуре (45 % вместо 42 %). С этим увеличением маслянистости связано уменьшение процентного содержания белков, зависящее в свою очередь от предшествующей культуры.

Аминокислотный состав семян подсолнечника остается относительно прочным, но содержание лизина, связанное с процентным содержанием протидов, зависит от условий культуры.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Baudet J., Leclercq Ph., Mossé J., 1971. Sur la richesse en lysine des graines de tournesol en fonction de leur teneur en protéines. *C. R. Acad. Sci.*, **273**, série D, 1112.

Cochard B., 1971. Date de labour et qualité du travail. I. Étude expérimentale de la relation date-qualité d'un labour. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 7, 566-575.

Coïc Y., Tendille G., Lesaint C., 1972. La nutrition azotée du tournesol (*Helianthus annuus*). Action sur le rendement et la composition biochimique de la graine. *C. R. Acad. Sci.*, **274**, série D, 885.

Cousin M., 1971. Travail du sol en exploitation de terrefort. Station d'Agronomie de Toulouse. *Rapport E. N. I. T. A.* de Bordeaux.

Decau J., Lencrerot P., Pujol B., 1972. Essai d'application au champ des données physiologiques relatives à l'influence de l'alimentation azotée sur la composition protéique de la graine de tournesol. *C. R. Acad. Sci.*, en cours de publication.

Decau J., Pujol B., 1969. Influence de l'alimentation hydrique et azotée sur la production et la qualité comparée des matières protéiques de grains de maïs portant ou non le gène Opaque 2 (O_2). *C. R. Acad. Sci.*, **268**, série D, 2343-2346.

EYRE J. V., 1931. Notes on oil development in the seed of a growing plant. *Biochem. J.*, **25**, 1902.

GIRAULT A., MOSSÉ J., BAUDET J., 1970. Étude des protéines de la graine de tournesol en vue de l'amélioration de leur teneur en lysine. *Proceeding* of a symposium Vienna, 8-12 June 1970. *Improving plants protein by Nuclear Techniques.*

MARTY J.-R., HILAIRE A., CABELGUENNE M., 1970. Influence du précédent, de la nature du sol et de l'irrigation sur la production du tournesol. *C. R. Travaux Station d'Agronomie de Toulouse.*

MAZLIAK P., 1968. *Le métabolisme des lipides dans les plantes supérieures.* Masson et Cie, Éd.

ROBELIN M., 1967. Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann. agron.*, **18** (6), 579-599.

ROLLIER M., 1970. Essai de fertilisation azotée du tournesol. *Rapport C. E. T. I. O. M.*, 1-43.

ROLLIER M., 1971. Étude de la fertilisation du tournesol. *Inform. tech. C. E. T. I. O. M.*, **24**, 1-22.

ROLLIER M., 1972. Influence de quelques obstacles mécaniques sur le développement du système radiculaire du tournesol. *C. R. Ve Conférence internationale sur le Tournesol*, Clermont-Ferrand (en cour-d'impression).

Ann. agron., 1973, **24** (3), 359-373.

EFFETS COMPARÉS DE L'IRRIGATION ET DE LA FUMURE AZOTÉE SUR LES PRODUCTIONS QUALITATIVES ET QUANTITATIVES DE MAÏS DE VARIÉTÉS DIFFÉRENTES

II. — Production de protéines

J. DECAU et B. PUJOL
avec la collaboration technique de A. Pace

Station d'Agronomie de Toulouse, I. N. R. A.,
Chemin de Borde-Rouge, Auzeville, B. P. nº 12, 31320 Castanet-Tolosan

RÉSUMÉ

Les variations du taux de protéines des grains de maïs soumis à diverses conditions d'alimentation azotée et hydrique ont été étudiées chez un maïs opaque 2 d'une part, chez divers maïs normaux d'autre part.

Les essais font apparaître, essentiellement en culture sèche, des taux protéiques supérieurs, chez le mutant, à ceux des maïs de référence placés dans des conditions culturales comparables.

Cependant, la production de matières azotées par hectare des maïs (+) l'emporte encore sur la production du mutant, ainsi que le rendement en grains.

La gamme des teneurs en protéines, observée chez le mutant, est plus large, pour des variations de fumures comparables, en culture sèche qu'en culture irriguée : de 8,6 à 12,6 p. 100 et de 8,9 à 11,8 p. 100 respectivement. En particulier, sous l'effet des mêmes fortes fumures, le maïs irrigué produit un grain plus pauvre en protéines que le maïs non irrigué.

Pour expliquer ces résultats, les effets relatifs de la fumure azotée et de l'irrigation sur l'absorption d'azote, sur la production de matière protéique et de matière sèche totale par la plante et les mêmes effets de l'irrigation sur la migration comparée des protides et de l'ensemble des substances vers le grain sont tour à tour envisagés.

Il apparaît ainsi qu' aux amples variations du taux de protéines du grain en culture sèche sont associés des rapports

$$\frac{\text{Protéines}}{\text{Matière sèche totale}} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right)$$

se différenciant davantage. En outre, à la relation linéaire :

$$\text{Taux de protéines p. 100 grain} = 0{,}913 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right) + 3{,}28$$

observée en culture sèche, s'oppose une relation parabolique entre ces mêmes grandeurs en cultures irriguée : $\text{Taux de protéines p. 100 grain} = 1{,}22 + 2{,}29 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right) - 0{,}10 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right)^2$.

L'aptitude relativement moindre à se déplacer vers le grain des substances azotées par rapport aux composés ternaires, en culture irriguée par rapport à la culture sèche, paraît être à l'origine de la différence observée dans l'enrichissement en azote du grain.

INTRODUCTION

A côté des problèmes de productivité et de rendement communs à toutes les cultures, le Maïs pose à l'agronome diverses questions relatives à la qualité, parmi lesquelles deux des plus difficiles résident dans la teneur peu élevée de sa graine en protéines (CAUDERON et FAUCONNEAU, 1971) et dans la faible valeur biologique de ses matières azotées (MOSSÉ, 1968).

La découverte de maïs mutants à grains riches en lysine, maïs opaque 2 (o_2) et floury 2 (fl_2) (MERTZ, BATES et NELSON, 1954), sans apporter une solution parfaite à ces problèmes de qualité (NELSON, 1970), constitue néanmoins un important progrès dans ce domaine.

Mais l'expression des potentialités génétiques du Maïs est liée à la fois aux conditions pédo-climatiques, culturales et nutritionnelles.

Dans un précédent mémoire (DECAU, 1970), nous avons étudié la production quantitative d'un maïs portant le gène mutant (o_2), soumis à diverses conditions d'alimentation azotée et hydrique, puis nous avons comparé cette production à celle de maïs normaux (+), placés de même, pour la plupart, dans des conditions d'alimentation azotée et hydrique voisines.

Les résultats ont mis en évidence une grande plasticité dans la production du maïs (o_2) sous ces conditions expérimentales, ils ont aussi montré que le rendement en grain de ce maïs (o_2), pour des conditions de nutrition sensiblement analogues, demeure un peu inférieur à celui des maïs (+).

Nous nous proposons d'aborder dans ce mémoire l'étude de la production de ces deux variétés de maïs sous l'angle des qualités protéiques de la graine. Nous envisagerons d'abord l'influence des fumures et de l'irrigation sur les taux de protéines des grains et sur la production de protéines par hectare. Nous examinerons ensuite les probabilités d'action de la fumure et de l'irrigation sur l'enrichissement de la graine en matières azotées. Enfin, nous discuterons les phénomènes qui influencent la composition du grain.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

A. — *Dispositifs culturaux*

Nous rappelons dans le tableau 1 les traitements (fumure azotée, irrigation) mis en jeu dans l'essai maïs o_2 ainsi que ceux auxquels ont été soumis les divers maïs normaux qui nous ont servi de référence.

Une description plus détaillée des conditions culturales est donnée dans le précédent mémoire (DECAU, 1970).

TABLEAU I

Variétés de maïs étudiées et traitements différentiels appliqués

Variétés	Traitements fertilisants (N kg/ha)				Conditions hydriques		
INRA 0_2	0	75	150	300	Avec irrigation (assurant l'ETM) (1)		
INRA 400	0	75	150	300	—	—	—
Funk's G 17 A	0	165	500	1 500	—	—	—
INRA 0_2	0	75	150	300	Sans irrigation		
INRA 400	0	75	150	300	—	—	
Pionneer 368 A	0	50	100	150	—	—	

(1) ETM : Évapotranspiration maximale du Maïs.

B. — *Mesures et dosages effectués à la récolte*

Après mesure du rendement en grain et de ses composantes (nombre d'épis par pied, nombre de grains par épi, poids d'un grain), puis étude de la répartition, entre les divers organes, des matières synthétisées en cours de culture, pour chaque récolte et pour chaque traitement, on a déterminé la teneur en azote total (N kjeldahl après réduction des nitrates) des différentes parties de la plante.

Les résultats obtenus sont rapportés aux traitements fertilisants appliqués puis analysés comme précédemment en tenant compte du niveau du facteur nutritif étudié (DECAU, 1970).

RÉSULTATS

A. — *Influence des fumures et de l'irrigation et différences variétales*

1. *Taux de protéines des grains.*

Les données du tableau 2 montrent l'enrichissement progressif du grain en azote, quels que soient la variété et le traitement hydrique, quand les fumures azotées augmentent. Cet enrichissement, proportionnel aux fumures pour les apports de 0 à 150 kg d'azote/ha, devient moins que proportionnel pour les apports plus importants mais il semble que le taux maximum d'azote ne puisse être atteint que pour des fumures très élevées, ainsi que l'indiquent les résultats obtenus avec le maïs normal *Funk's G 17 A* irrigué.

Par ailleurs, les données du tableau 2, confirmant des résultats antérieurs (DECAU et POLLACSEK, 1970), montrent que, pour une même gamme de fumure, l'amplitude de variation du taux de protéines du grain, pour le maïs *INRA* 0_2, est plus grande en culture sèche qu'en culture irriguée : tandis que les teneurs en matières azotées sont voisines en l'absence d'apport d'azote, ce taux est significativement plus élevé après forte fumure, en milieu non irrigué. En revanche, dans la zone des fumures

moyennes, les taux de matières azotées du grain sont les mêmes quelles que soient les conditions d'alimentation hydrique.

Les différences variétales sont difficiles à interpréter. Notons cependant qu'à fumure égale, les maïs *INRA 400* et *Pionneer 368 A* ont produit un grain plus pauvre en protéines que celui du maïs (o_2), tandis que le *Funk's G 17 A* irrigué apparaît au contraire comme plus riche que l'*INRA* o_2 irrigué.

TABLEAU 2

Teneur du grain des différents maïs en matières azotées ou « protéines » et production globale en fonction des traitements expérimentés

Variété/conditions hydriques	*INRA* 0_2 non irrigué				*INRA* 0_2 irrigué			
Fumure (N kg/ha)	0	75	150	300	0	75	150	300
Protéines % du poids de grain	8,6	9,8	11,1	12,6	8,9	9,9	11,1	11,8
Production de protéines (kg/ha) ...	323	452	564	646	480	739	799	869
Variété/ (1) conditions hydriques	*INRA 400* non irrigué				*INRA 400* irrigué			
Fumure (N kg/ha)	0	75	150	300	0	75	150	300
Protéines % du poids de grain	7,8	9,4	10,7	10,9	8,8	9,7	10,5	10,9
Variété/conditions hydriques	*Pionneer 368 A* non irrigué				*Funk's G 17 A* irrigué			
Fumure (N kg/ha)	0	50	100	150	0	165	500	1 500
Protéines % du poids de grain	7,2	7,7	8,1	8,6	9,4	12,7	13,3	14,3
Production de protéines (kg/ha) ...	331	447	543	641	742	1 180	1 142	1 243

(1) Le maïs *INRA 400* ayant été affecté dans sa production par une chute de grêle en cours de culture, nous n'envisagerons pas ici ses rendements en protéines.

2. *Production de protéines par hectare.*

A partir de ces taux de protéines et des rendements en grain indiqués dans la note précédente (DECAU, 1970), nous avons pu calculer les quantités de matières azotées produites par hectare par les diverses variétés recevant les traitements différents.

En culture sèche, chez le maïs (o_2), nous voyons ainsi (tabl. 2) que cette production est seulement de 323 kg/ha en l'absence de fumure alors qu'elle est deux fois plus grande sous l'effet d'une forte fumure (300 kg d'azote/ha). Dans les mêmes

conditions hydriques, un tel résultat a été obtenu chez *Pionneer 368 A* pour un apport d'azote deux fois moins important.

L'effet de l'irrigation se manifeste très positivement, notamment chez le maïs (o_2) : dès l'apport de 75 kg N/ha, la production de protéines dépasse déjà celle obtenue en culture sèche avec la plus forte fumure. En revanche, le maximum de production, dans les conditions les plus favorables (869 kg/ha), demeure très inférieur aux productions correspondantes données par *Funk's G 17 A* (1 180 kg/ha).

Mais la comparaison des rapports Production de protéines/Quantité d'azote apportée nécessite une analyse plus approfondie du comportement des plantes. Les résultats antérieurs (DECAU, 1970) nous ont montré que l'effet « azote » varie selon les conditions pédologiques et culturales. Nous sommes donc à nouveau amenés à rapporter certaines de nos observations aux niveaux du facteur azote, c'est-à-dire aux quantités d'azote absorbées par les différentes cultures soumises à des traitements variés.

B. — *Modalités d'action de la fumure et de l'irrigation Influence variétale*

1. *Absorption d'azote par les maïs placés dans des conditions expérimentales variées.*

L'analyse des résultats, selon la méthode des polynômes orthogonaux, permet d'observer que les quantités d'azote absorbées par les maïs varient suivant les fumures appliquées selon des fonctions paraboliques telles que :

$$N_t = 84{,}8 + 0{,}663\,x - 0{,}001\,01\,x^2 \qquad (INRA\ o_2\ \text{NI})$$
$$N_t = 122{,}8 + 0{,}728\,x - 0{,}001\,08\,x^2 \qquad (INRA\ o_2\ \text{I})$$

où N_t et x représentent respectivement la quantité totale d'azote contenue dans la plante entière et la quantité d'azote apportée par la fumure, l'une et l'autre exprimées en kg par hectare.

Les données (fig. 1) montrent, en l'absence de fumure, le comportement différent des variétés, en milieu irrigué ou non irrigué et l'effet moins que proportionnel exercé par des fumures croissantes.

Ces résultats sont en accord avec les observations de SHIMSHI (1969) obtenues dans des conditions écologiques et expérimentales toutefois en partie différentes.

Si nous considérons maintenant comme variables les quantités d'azote absorbées, nous pouvons analyser, pour chaque essai, l'influence des techniques culturales (fumure et irrigation) et examiner le rôle joué par les caractères variétaux.

2. *Taux de protéines du grain en relation avec l'alimentation azotée de la plante.*

Les courbes de la figure 2 montrent que le taux de protéines du grain augmente avec les quantités d'azote absorbées par les cultures. Pour toutes les variétés et pour tous les traitements, exception faite du *Funk's G 17 A* soumis à des fumures anormalement élevées, la relation teneur en protéines du grain et N apporté demeure linéaire dans les limites des fumures appliquées ; mais les pentes des différentes courbes sont faibles. Ce fait est dû à ce que la fumure azotée n'agit pas seulement sur l'accumulation de l'azote dans le grain, mais exerce aussi une action positive sur l'ensemble des synthèses au niveau de ce grain.

Les différences dans les pentes des courbes I et II traduisent l'influence de l'irrigation : en culture irriguée, les protéines se trouvent diluées dans une plus grande masse, du fait de l'action très favorable d'un apport d'eau supplémentaire sur la

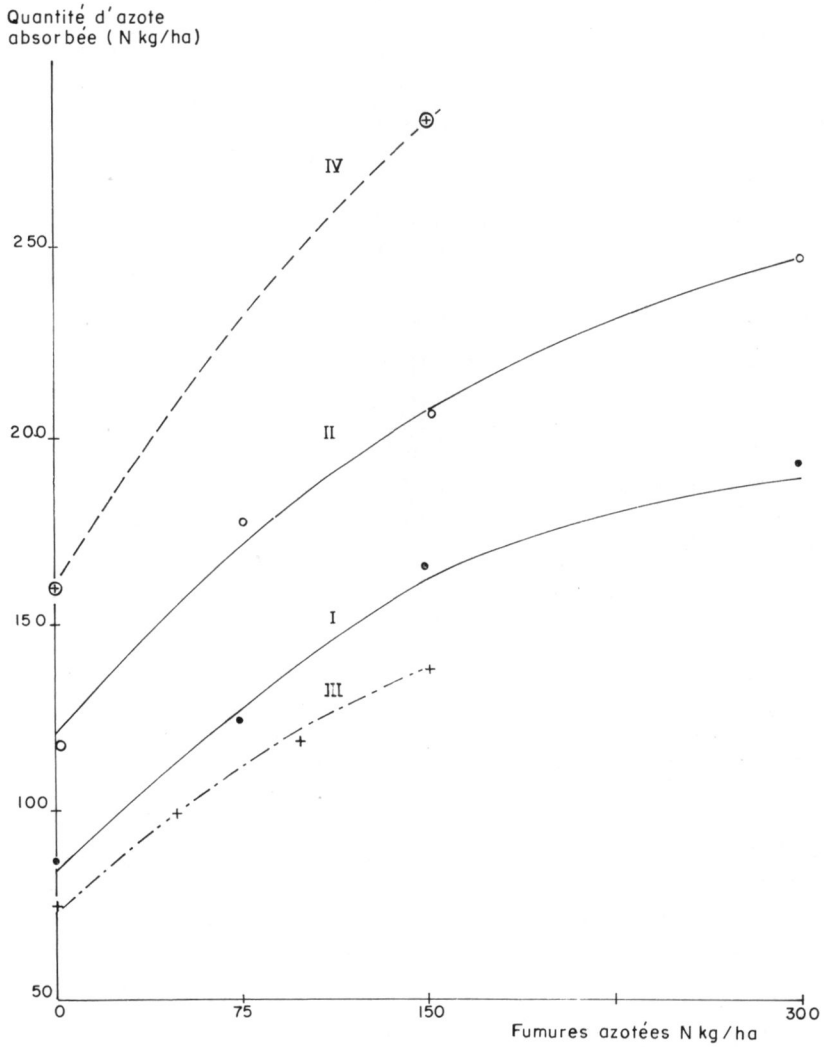


FIG. 1.— *Absorption totale d'azote par les maïs en fonction des fumures*
II : *INRA* o_2 non irrigué III : *Pionneer 368 A* non irrigué
I : *INRA* o_2 non irrigué IV : *Funk's G 17 A* irrigué

photosynthèse ainsi que sur les phénomènes de transfert vers le grain (DECAU, 1970).

L'influence variétale apparaît nettement, en culture sèche, au niveau des teneurs des grains en protéines. Le maïs (o_2), moins productif, est beaucoup plus riche en matières azotées que le *Pionneer 368 A*. En revanche, en culture irriguée, le mutant (o_2) et le maïs (+) ne diffèrent pas significativement.

3. *Production de protéines/ha et azote absorbé par les cultures.*

La masse de protéines produite par hectare croît linéairement, dans les limites envisagées (fig. 3), avec les quantités d'azote absorbées par les cultures, mais, différence avec les résultats précédents (fig. 2), la production de protéines croît plus vite que le taux de matières azotées du grain quand s'améliorent les conditions de nutrition : la production de protéines par le grain bénéficie de la double action de l'azote sur la protéosynthèse et sur la photosynthèse.

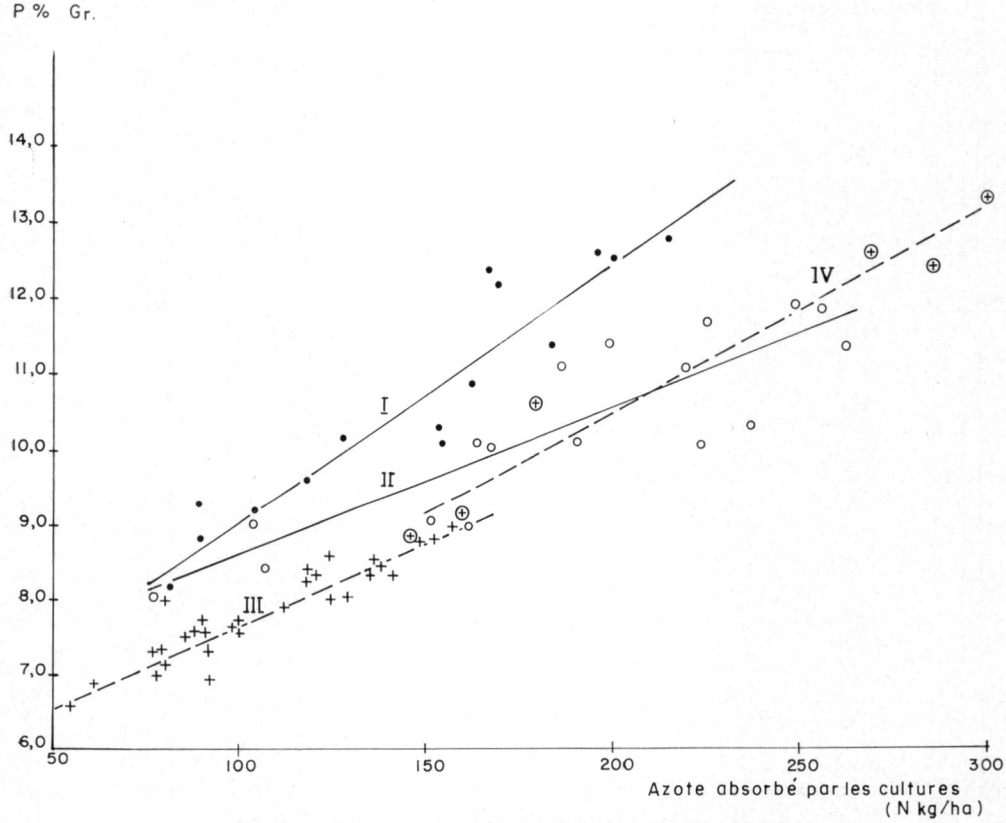


FIG. 2. — *Teneur en protéines* (p. 100 Gr) *du grain de différentes variétés de maïs en fonction de la quantité d'azote absorbée par la culture*
I (•), II (○) : *INRA* o_2 non irrigué et irrigué,
III (+) : *Pionneer 368 A* non irrigué,
IV (⊕) : *Funk 's G 17 A* irrigué.

L'irrigation exerce un effet positif significatif sur cette production : les différences d'ordonnées entre les points de même abscisse (courbes I et II) traduisent l'effet spécifique de cette pratique, mais il convient de rappeler qu'à cet effet, s'ajoute une action indirecte qui s'exerce par l'intermédiaire d'une absorption accrue d'azote.

L'effet variétal se traduit par une production de protéines/ha plus grande pour les maïs normaux que pour le mutant ; il en est ainsi en culture irriguée et même en culture sèche où, malgré son taux de protéines plus élevé, le maïs (o_2) ne parvient pas à un niveau de production de protéines comparable à celui des maïs (+), du fait des écarts de rendement précédemment notés (DECAU, 1970).

C. — *Phénomènes influençant la composition du grain*
Analyse et discussion

Les résultats de cette étude mettent en évidence une plasticité du grain de maïs, en ce qui concerne la formation de protéines, en relation avec la fumure, l'irrigation, la variété. Cette plasticité dépend étroitement de l'absorption d'azote par les plantes. Cependant, le taux de protéines de la graine ne saurait dépendre uniquement de ce phénomène.

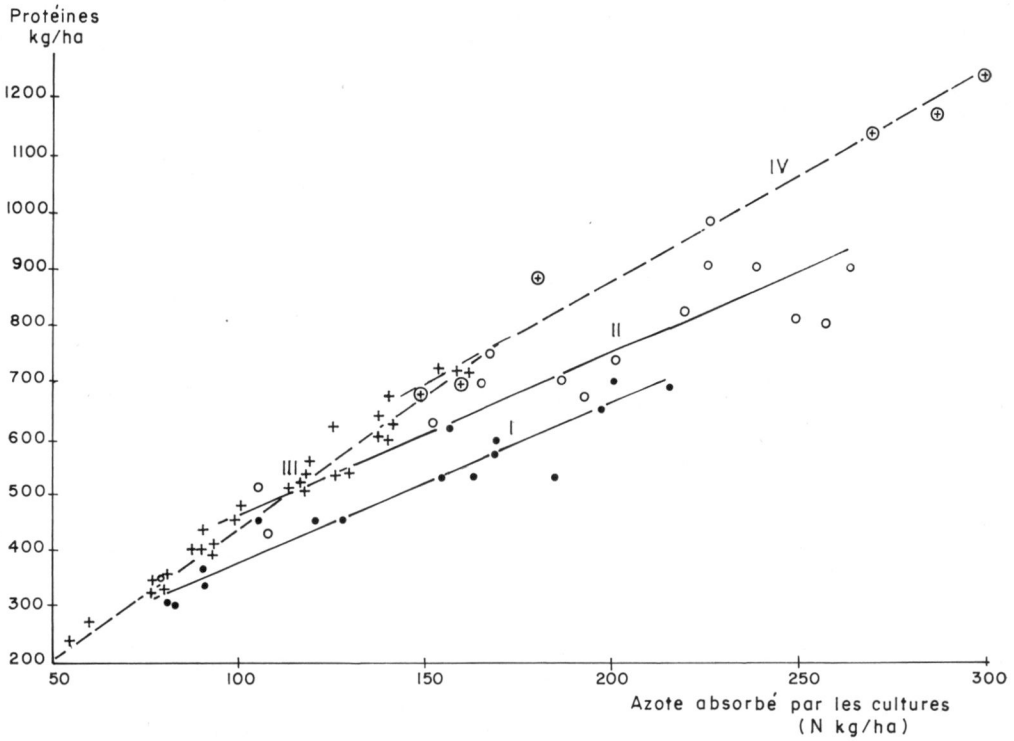


FIG. 3. — *Rendement en protéines des différents maïs en fonction du niveau du facteur azote*
I (●), II (○) : maïs *INRA* o_2 non irrigué et irrigué,
III (+) : *Pionneer 368 A* non irrigué,
IV (⊕) : *Funk's G 17 A* irrigué.

Nous allons essayer maintenant d'approfondir et de discuter l'analyse des phénomènes qui font varier la composition du grain. Nous limiterons notre étude au cas unique de l'essai mais opaque 2 dans lequel nous avons le plus étroitement contrôlé les techniques et les traitements mis en jeu.

Le taux de protéines du grain dépend non seulement de l'absorption d'azote par la plante, mais aussi des activités relatives de photosynthèse et de protéosynthèse de la plante entière (PE), activités relatives que mesure le rapport :

$$\frac{\text{Protéines PE}}{\text{Matière synthétisée totale}}$$

La relation entre le taux de protéines du grain et ce rapport a été étudiée.

Cependant cette approche, quoique féconde, s'avère encore insuffisante, dans quelques cas, pour expliquer les teneurs en protides du grain rencontrées. Il s'est avéré nécessaire de considérer la migration des substances vers le grain et plus particulièrement, la migration relative des substances azotées et des substances carbonées, non azotées.

1. *Variation des rapports* $\frac{\textit{Protéines}}{\textit{Matière synthétisée}}$ *dans la plante entière*

Les fumures azotées accroissent davantage l'absorption d'azote par les cultures que l'activité photosynthétique (tabl. 3). Il s'ensuit un accroissement global du rapport $\frac{\text{Protéines}}{\text{Matière sèche totale}}\left(\frac{\text{MS}}{\text{Pr}} \times 100\right)$ avec les fumures quelles que soient les conditions hydriques ; c'est ainsi que ce rapport, qui, en culture non irriguée et irriguée, est de 5,8 et 6,4 en l'absence de fumure, atteint les valeurs de 10,1 et 10,0, lorsque la fumure azotée utilisée est la plus élevée.

L'irrigation exerce un effet complexe : cette technique favorise à tous les niveaux à la fois l'absorption de l'azote et la photosynthèse nette, mais, en l'absence de fumure, l'irrigation agit davantage sur la protéosynthèse, d'où un rapport $\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100$ plus élevé en culture irriguée (6,4) qu'en culture sèche, dans les parcelles témoins sans fumure (tabl. 3).

TABLEAU 3

Mode d'action de la fumure azotée et de l'irrigation sur la teneur en matières azotées des grains du maïs mutant opaque 2 (o_2).

Conditions hydriques	Culture non irriguée				Culture irriguée			
Fumure azotée (N kg/ha)	0	75	150	300	0	75	150	300
Azote absorbé par la culture (N kg/ha)	85,7	125,4	166,5	193,6	119,5	178,3	206,4	247,0
Protéines de la plante entière (PE) (N × 6,25) kg/ha	535,6	783,8	1 040,6	1 210,0	746,9	1 114,4	1 290,0	1 543,8
Matière sèche synthétisée totale (q/ha)	92,0	107,1	120,8	120,6	115,7	156,3	154,2	154,4
$\frac{\text{Protéines (PE)}}{\text{Matière sèche totale}} \times 100$	5,8	7,3	8,6	10,1	6,4	7,1	8,4	10,0
Migration relative des substances azotées et non azotées (Mr) (1)	1,49	1,36	1,28	1,25	1,37	1,39	1,32	1,17

(1) $\text{Mr} = \frac{\text{N (grain)}}{\text{N (PE)}} \times \frac{\text{MS (PE)}}{\text{MS (grain)}}$

2. *Taux de protéines de la graine et rapport* $\frac{\textit{Protéines}}{\textit{Matière sèche totale}}$ *dans la plante.*

Les variations observées dans les taux de protéine de la graine sont étroitement liées à celles du rapport $\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100$, ainsi que le montrent les courbes (I) et (II)

de la figure 4. Mais ces résultats mettent aussi en évidence la différence de réaction de la plante selon les conditions d'alimentation en eau : tandis qu'en culture sèche, le taux de protéines de la graine varie linéairement, dans les limites des fumures étudiées, en fonction du rapport $\frac{Pr}{MS} \times 100$, en culture irriguée et pour les mêmes fumures, l'enrichissement en protéines de la graine est moins que proportionnel à celui de la plante entière.

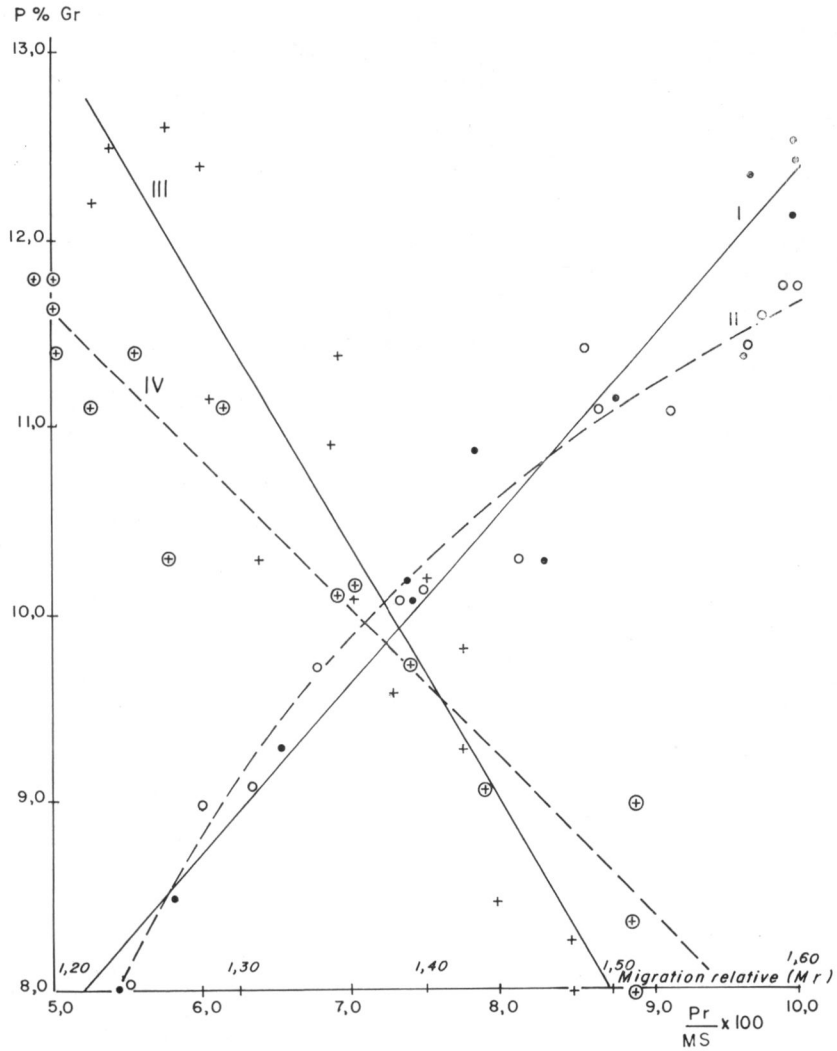


FIG. 4. — *Relations entre le taux de protéines* (p. 100 Gr) *des grains du maïs mutant et les synthèses et migrations relatives dans la plante*

I (●) : P. p. 100 Gr = $0{,}913 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right) + 2{,}28$ (non irrigué)

II (○) : P. p. 100 Gr = $-1{,}22 + 2{,}29 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right) - 0{,}10 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right)$ (irrigné)

III (+) : P. p. 100 Gr = $-16{,}9$ (Mr) $+ 33{,}35$ (non irrigué)

IV (⊕) : P. p. 100 Gr = $-9{,}96$ (Mr) $+ 23{,}56$ (irrigué)

3. *Migration relative des substances vers le grain.*

Pour expliquer les écarts observés, nous avons essayé de mesurer l'influence exercée par l'irrigation sur la migration relative (Mr) vers le grain des substances azotées $\left(\frac{\text{N grain}}{\text{N PE}}\right)$ et de l'ensemble des substances que renferme la plante entière $\left(\frac{\text{MS grain}}{\text{MS PE}}\right)$. Cette migration peut se définir par le rapport :

$$\text{Mr} = \frac{\text{N du grain}}{\text{N de PE}} \times \frac{\text{MS de PE}}{\text{MS du grain}}.$$

Ce rapport décroît dans tous les traitements lorsque la fumure augmente (tabl. 3) et il est significativement plus faible, lorsque l'apport d'azote est le plus fort, en culture irriguée qu'en culture sèche.

4. *Taux de protéines du grain et migration relative des substances vers le grain.*

Il existe des relations significatives entre la teneur du grain en protéines P et la migration relative des substances vers le grain.

P. p. 100 Gr = — 16,9 (Mr) + 33,35 (*INRA* o_2 NI)
P. p. 100 Gr = — 9,96 (Mr) + 23,56 (*INRA* o_2 I)

Mais les maïs irrigués diffèrent eux-mêmes significativement à cet égard des maïs non irrigués :

— les pentes des courbes représentatives de ces fonctions sont différentes (courbes III et IV de la fig. 4), le maïs irrigué présentant des variations d'amplitude moindre que celles observées en culture non irriguée ;

— pour les taux de protéines élevés de la graine, c'est-à-dire lorsque l'alimentation en azote est la plus forte, la migration relative des substances azotées vers le grain est moins élevée que celle que l'on peut observer en culture sèche.

Ces résultats concourent à expliquer les différences de taux de protéines observées selon l'alimentation hydrique, mais ils ne permettent qu'une approche globale des phénomènes au niveau de la plante entière. Il paraît important de tenter d'analyser les processus au niveau du grain.

5. *Taux de protéines et formation du grain.*

Au cours de cette expérimentation, nous avons notamment mesuré le nombre de grains formés par pied et le poids moyen du grain. Ces données traduisent les résultats globaux des deux grandes phases du développement du grain, la première allant de l'initiation florale à la fécondation, la seconde de la fécondation à la maturité. Ces résultats mettent en évidence :

— une action positive de la fumure azotée et de l'absorption d'azote qui en résulte sur le nombre de grains formés par pied ;

— une influence positive de l'irrigation. Cette technique exerce son action principalement par l'intermédiaire d'une absorption accrue d'azote ;

— une stabilité relative du poids du grain, caractéristique variétale insensible à l'effet azote et influencée faiblement (+ 7 p. 100) par l'irrigation.

L'enrichissement en azote du grain est donc concomitant de l'augmentation du nombre de grains par pied, l'un et l'autre de ces phénomènes dépendant de l'alimentation azotée. L'augmentation du taux de protéines du grain ne s'accompagne pas d'une accumulation plus grande de substances carbonées non azotées, de sorte que si nous envisageons nos résultats au niveau du grain, à la notion de migration relative des substances azotées et non azotées, nous devons substituer celle d'enrichissement en protéines du grain.

Mais cette analyse nous amène à poser différentes questions : l'augmentation du taux global de protéines du grain est-elle due à une variation du rapport embryon/albumen, à un enrichissement de l'un et l'autre — ou de l'un ou l'autre — des organes du grain? Dans chacun d'eux — éventuellement — quel type de protéines se trouve particulièrement affecté? Seule, une analyse ultérieure des protéines permettra de répondre partiellement à ces questions.

CONCLUSIONS

La fumure azotée et l'irrigation du maïs mutant opaque 2 associent aux effets sur les rendements, antérieurement mesurés (DECAU, 1970), une action très nette sur la teneur des grains en protéines.

La composition des grains apparaît ainsi sous l'étroite dépendance de la synthèse totale et de la protéosynthèse réalisées par la plante entière et de la migration des substances ternaires et quaternaires vers le grain, que règlent, pour un génotype donné, les niveaux relatifs de l'alimentation en eau et en azote.

Toutefois ces résultats, obtenus en une étude globale, à l'échelle de la plante entière, font apparaître la nécessité d'approches plus fines pour éclairer les processus de synthèse et d'accumulation des matières protéiques des grains.

Par ailleurs, le taux de matières azotées du grain, s'il fournit une indication indispensable à l'appréciation de la valeur nutritionnelle de la récolte, n'apporte pas à lui seul à cet égard une information suffisante.

Des éléments de réponse à ces problèmes peuvent être apportés par une étude de la répartition des matières azotées des grains en leurs principales protéines et par la détermination de la composition en acides aminés.

Reçu pour publication en octobre 1972.

SUMMARY

COMPARING THE EFFECTS OF IRRIGATION AND NITROGENOUS FERTILIZERS ON THE YIELD, QUALITATIVELY AND QUANTITATIVELY, OF VARIOUS VARIETIES OF MAIZE. II. — YIELD OF PROTEIN

An opaque mutant maize $2(o_2)$, subjected to various nitrogenous feeding conditions, chiefly in dry crops, reacts more markedly than natural maizes (+) and evinces a higher protein content (N × 6.25). However, the yield of both grains and nitrogenous matter per acre of maize (+) remains higher than the mutant's.

The range of protein contents in the mutant is larger, (fertilizing variations being comparable) in dry than in wet crops *i. e.*, 8.6 to 12.6 p. 100 and 8.9 to 11.8 p. 100, respectively. In particular, both maizes being equally heavily fertilized, the protein content of the irrigated-maize grain is lower than that of the dry crop.

To explain this, the relative effects of nitrogenous fertilizing and of irrigation on nitrogen absorption on the plant's yield of both protein and total dry matter, and the same irrigation effects on the compared migration of the protids and the other substances to the grain are dealt with in turn.

Thus is evinced that the larger protein-contents of the dry-crop grain are related to more different ratios, *i. e.* :

$$\frac{\text{Proteins}}{\text{Total dry matter}} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right)$$

In addition, contrariwise to the linear relation : protein content grain percentage :

$$0.913 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right) + 3.28$$

noted for dry crops, is a parabolic relation midway between these same two wet-crop quantities, protein rate/grain percentage :

$$1.22 + 2.29 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right) - 0.10 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{MS}} \times 100\right)^2.$$

The comparatively lower capability of nitrogenous substances to shift towards the grain, compared with that of ternary compounds and instanced in both wet and dry crops, apparently stems from the different nitrogenous enrichment of the grain that was observed.

ZUSAMMENFASSUNG

GEPRÜFTE AUSWIRKUNGEN DER BEWÄSSERUNG UND DER STICKSTOFFDUNGUNG BEI QUALITATIVEN UND QUANTITATIVEN ERZEUGUNGEN VON MAIS VERSCHIEDENER SORTEN

II. — ERZEUGUNG VON PROTEINEN

Ein mutationierter opaker Mais 2 (o_2), der verschiedenen Bedingungen bei Stickstoffversorgung in trockener Kultur unterworfen ist, reagiert durch eine Anreicherung des Samens an Proteinen (N × 6.25) noch mehr als die normalen Maise (+). Indessen ist die Erzeugung von stickstoffhaltigen Substanzen pro ha Mais (+) noch überwiegender als die Mutationserzeugung und der Samenertrag.

Für vegleichbare Düngungsvariationen ist die Reihe der bei der Mutation beobachteten Proteingehalte breiter in trockner Kultur als in bewässerter : beziehungsweise 8,6 bis 12,6 p. 100 und 8,9 bis 11,8 p. 100. Besonders, under Wirkung derselben starken Düngungen, erzeugt der bewässerte Mais einen Samen, der an Protein ärmer ist als der unbewässerte Mais.

Um diese Ergebnisse zu erklären, werden die relativen Wirkungen der stickstiffhaltigen Düngung und der Bewässerung nach Stickstoffsabsorption, auf die Erseugung eines proteinhaltigen Stoffes und einer ganzen Trockensubstanz durch die Pflanze, sowie die selben Wirkungen der Bewässerung au f die verglichene Wanderung der Protiden und der gesamten Substanzen zum Samen abwechselnd in Betrachtung gezogen.

Es zigt sich also, dass Beziehungen zu den grössten Veränderungen des Proteinsatzes im Samen bei Trockenanbau bestehen :

$$\frac{\text{Proteine}}{\text{Totale Trockensubstanz}} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{TS}} \times 100\right)$$

die sich mehr unterscheiden. — Ausserdem stellt sich der bei Trockenanbau beobachteten linearen Beziehung : Proteinsatz p. 100 Samen :

$$0{,}913 \left(\frac{\text{Pr}}{\text{TS}} \times 100\right) + 3{,}28$$

eine parabolische Beziehung zwischen den selben Grössen bei bewässertem Anbau gegenüber : Proteinsatz p. 100 Samen :

$$1{,}22 + 2{,}29 \left(\frac{Pr}{TS} \times 100\right) - 0{,}10 \left(\frac{Pr}{TS} \times 100\right)^2.$$

Die relativ geringere Anpassungsfähigkeit der stickstoffhaltigen Substanzen im Verhältnis zu den ternären Verbindungen bei bewässertem Anbau gegenüber des trockenem Anbaus zum Samen hinzuwandern, scheint Ursache des beobachteten Unterschieds in der Anreicherung des Samens an Stickstoff zu sein.

РЕЗЮМЕ

Сравнительные эффекты орошения и азотных удобрений на качество и количество продукции разных сортов кукурузы.
Белковая продукция.

Ж. ДЕКО, Б. ПЮЖОЛЬ.

Мутант кукурузы опак 2 (O_2), поставленный в различные условия азотного питания, с орошением, или без него, реагирует гораздо лучше нормальной кукурузы (+) в смысле обогащения зерна белком (N × 6,25). Несмотря на это общая продукция азотистых веществ и урожай зерна на гектар нормальной кукурузы (+) все-же превышают таковые у мутанта.

Гамма содержаний белка, наблюдаемая у мутанта, является более широкой для сравниваемых изменений удобрения в культуре без орошения, чем в орошаемой культуре : от 8,6 до 12,6 % и от 8,9 до 11,8 % соответственно. В частности, под действием одинаковых увеличений доз удобрения, орошаемая культура кукурузы дает зерно менее богатое белками, чем неорошаемая кукуруза.

Для об'яснения этих результатов поочередно рассматриваются относительные эффекты азотного удобрения и орошения на поглощение азота растением, на образование этим растением белковых веществ и общего сухого вещества, и те-же эффекты орошения, на сравнительную миграцию белковых веществ и общности метаболитов в зерно.

И становится ясным, что более крупным изменениям содержания белка в зерне кукурузы возделываемой без орошения, соотвествуют более дифференцированные формулы : $\frac{\text{Белки}}{\text{Общее сухое вещ.}} \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right)$. Кроме того, линейному соотношению : Процент белка % Зерно $= 0{,}913 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right) + 328$, наблюдаемому в культуре без орошения, противуполагается параболическая формула тех-же величин для культур орошаемых : Процент белка % Зерно $= 1{,}22 + 2{,}29 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right) - 0{,}10 \left(\frac{Pr}{MS} \times 100\right)^2$.

Относительно меньшая способность азотистых веществ к миграции в зерно, по сравнению с тройными соединениями, в орошаемых культурах по сравнению с культурами неорошаемыми, может являться как кажется первопричиной разницы наблюдаемой в обогащении зерна азотом.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CAUDERON A., FAUCONNEAU G., 1971. Le problème des protéines. *Cultivar*, **29**, 3-5.

DECAU J., 1970. Effets comparés de l'irrigation et de la fumure azotée sur les productions qualitatives et quantitatives de maïs de variétés différentes. I. Rendements en grain. *Ann. agron.*, **21** (4), 335-349.

DECAU J., POLLACSEK M., 1970. Influence de la fumure azotée et de l'irrigation sur le rendement et la production de protéines de maïs-grain portant ou non le gène o_2. In *Improving Plant Protein by Nuclear Technique*. I. A. E. A. Symp. Vienne.

MERTZ E. T., BATES L. S., NELSON O. E., 1964. Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science*, **145**, 279-282.

MOSSÉ J., 1968. Les protéines des céréales. *Prog. Chim. Agric. et Al.*, 47-81.

MOSSÉ J., BAUDET J., LANDRY J., MOUREAUX Th., 1966. Étude des protéines du maïs. II. Comparaison entre les compositions en acides aminés et les proportions mutuelles de fractions protéiques des grains normaux et mutants. *Ann. Physiol. Vég.*, **8** (4), 331-334.

NELSON Jr., O. E., 1970. Improvement of plant protein quality. In *Improving plant protein by nuclear techniques*. I. A. E. A. Symp. Vienne.

SHIMSHI D., 1969. Interaction between irrigation and plant nutrition. In *Transition from extensive to intensive agriculture with fertilizers*. Berne, 111-120.

Ann. agron., 1973, **24** (3), 375-393.

LE PROFIL SALIN DES SOLS. MÉTHODES D'ÉTUDE ET SIGNIFICATION : APPLICATION AUX SOLS HALOMORPHES DU MIDI DE LA FRANCE

J. SERVANT

Service d'Étude des Sols,
Centre de Recherches de Montpellier, I. N. R. A.,
9 place Viala, 34060 Montpellier Cedex

RÉSUMÉ

Après avoir défini le concept de profil salin, on procède dans une première partie, à un exposé critique de son approche analytique. On introduit les notions de profil salin potentiel, profil salin agronomique et profil salin potentiel corrigé ainsi que celles de profils salins ascendant, descendant et peu différencié.

Dans une seconde partie, on présente différents profils salins d'été pour des sols du Roussillon et de la Camargue, en distinguant les taches salées de la zone cultivée, les zones à halophytes (enganes et sansouïres) et les dépressions intérieures salées.

La troisième partie intéresse l'utilisation du profil salin comme indice pédogénétique en milieu halomorphe.

INTRODUCTION

On désigne ordinairement sous le terme de salinisation, le processus pédologique suivant lequel le sol s'enrichit anormalement en sels solubles, acquérant ainsi le caractère salin.

Dans la majorité des cas, ce processus procède d'une action *per ascensum* : remontée des sels dans le profil à partir d'une nappe phréatique peu profonde constituant la source de sels solubles.

Le processus antagoniste est désigné sous le terme de désalinisation et procède généralement d'une action *per descensum*. Il concerne l'entraînement des sels

solubles vers le bas sous l'action des eaux de pluie, d'inondation ou d'irrigation.

La répartition des sels solubles dans le profil des sols, permet de matérialiser, à un moment donné, la résultante de ces actions. Nous la désignerons sous le vocable de *profil salin*.

De même que le profil hydrique ou le profil calcaire renseignent sur la distribution de l'eau ou du carbonate de calcium dans le sol, le *profil salin* permet de rendre compte de la distribution quantitative et qualitative des divers sels solubles présents à différents niveaux du profil des sols salés.

Le profil salin constitue une « grandeur » fondamentale au cours de l'étude des processus d'halomorphie, car il permet une approche globale de la salinité du sol, et fournit, d'autre part, un critère permettant de situer l'évolution du sol au sein de la séquence halomorphe.

I. — ÉTUDE SUR LE TERRAIN-ÉCHANTILLONNAGE

Le prélèvement d'échantillons au niveau d'une tranchée pédologique peut constituer un moyen d'étude du profil salin, mais une telle pratique n'est pas favorable aux prélèvements saisonniers dans une zone bien précise, en ce sens que le terrain va être bouleversé par la mise en place de la tranchée, et que tout futur prélèvement n'aurait aucune signification.

Si donc on envisage une étude dynamique du profil salin, dans une aire bien définie, avec plusieurs prélèvements dans l'année, on est obligé d'avoir recours à des carottages, à moins de disposer d'appareils enregistreurs permettant de mesurer la salinité *in situ*, à divers niveaux du sol. Afin de pouvoir prélever avec précision tous les dix centimètres, et ce, sur une profondeur pouvant aller jusqu'à deux mètres, on utilise une tarière spéciale permettant d'obtenir une carotte non perturbée, ce qui facilite l'échantillonnage et la mesure des différentes profondeurs. L'inconvénient de ce procédé est de limiter le volume de l'échantillon, ce qui peut poser des problèmes pour la mise en œuvre de certaines mesures de salinité. En ne prélevant que tous les vingt ou trente centimètres, on peut utiliser une tarière normale, mais on obtient un profil salin beaucoup plus grossier.

II. — MESURE ET EXPRESSION DE LA SALINITÉ ET DES PROFILS SALINS

A. — *Choix des méthodes*

L'établissement du profil salin étant basé sur de nombreuses mesures de salinité effectuées dans différentes tranches de sols, superposées et régulièrement espacées, l'allure générale et la signification des profils vont être quelque peu influencées par le choix des techniques d'extraction des sels solubles, lesquelles peuvent se résumer à deux cas bien précis : l'extrait aqueux à rapport Sol/Eau constant = 1/5 et l'extrait aqueux à rapport Sol/Eau variable du type pâte saturée.

Considérons en effet deux échantillons de terre séchés sur lesquels on va effectuer des mesures de salinité au laboratoire, et posons que ces deux échantillons renferment la même quantité de sels solubles, mais sont caractérisés par des textures différentes : A est argileux et S est sablo-limoneux.

Dans l'extrait 1/5 (10 g de sol dans 50 cm^3 d'eau), A et S vont présenter des salinités très voisines. Dans l'extrait de pâte saturée, A et S vont, par contre, présenter des salinités différentes car pour confectionner cet extrait on va utiliser par exemple 300 g de terre et 250 cm^3 d'eau pour A alors qu'on ne prendra que 300 g de terre et 110 cm^3 pour S.

Dans ces conditions, l'échantillon S va apparaître plus salé que l'échantillon A.

De la même façon, des échantillons A et S renfermant des quantités différentes de sels et présentant des salinités différentes au niveau de l'extrait 1/5, peuvent, par le jeu des dilutions variables, présenter des salinités identiques dans l'extrait de pâte saturée.

Cet exemple illustre deux approches différentes de la salinité. Pour l'extrait de pâte saturée, il s'agit d'une *approche « agronomique »* qui, en introduisant des quantités d'eau proportionnelles à la capacité de rétention du sol, vise à se situer au niveau des solutions pouvant exister dans le sol en place.

Pour l'extrait au 1/5, il s'agit d'une *approche « chimique »* conduisant à une dissolution exhaustive de tous les sels solubles présents dans l'échantillon, sans tenir compte des caractéristiques texturales ou hydriques, ni des conditions pouvant réellement régner dans le sol en place.

Partant de ces considérations, on constate que si le sol étudié est formé d'une superposition de strates de type A ou par une superposition de type S, les profils salins vont être comparables qu'il s'agisse de l'une ou de l'autre méthode.

Par contre, si le sol étudié est formé par une alternance de strates de type A et de type S, le profil salin obtenu pour l'extrait 1/5 différera notablement de celui que l'on peut tracer pour l'extrait de pâte saturée et l'on peut s'interroger sur la signification de chacun de ces profils.

Considérons par exemple un sol formé d'une alternance de strates A et S, et supposons qu'il soit imprégné par une solution saline de concentration constante quelle que soit la strate.

Compte tenu des propriétés hydriques des strates A et S, les premières vont renfermer plus de solution saline que les secondes et par conséquent plus de sels. L'extrait 1/5 va conduire à une représentation en pics et en creux, les échantillons A apparaissant plus salés que les échantillons S.

Par contre, le profil salin obtenu pour l'extrait de pâte saturée va éliminer les pics et les creux du fait de l'intégration des caractéristiques hydriques du profil ; son tracé va être sub-vertical, traduisant — ce qui est le cas — une imprégnation saline de concentration constante à tous les niveaux du profil.

Dans ce type de sol, les « pics » du profil salin 1/5 ne doivent pas être systématiquement interprétés comme des maxima de salinité, conséquence d'une concentration des sels, car ils peuvent ne traduire que des différences de texture. En termes de dynamique des sels solubles, les résultats obtenus sur l'extrait de pâte saturée seront alors beaucoup plus intéressants.

L'extrait 1/5, de par sa forte dilution, conduit à une mise en solution complète de tous des sels solubles présents dans l'échantillon. Il permet l'établissement

d'un *profil salin potentiel* dont les caractéristiques ont été exposées ci-dessus.

En ce qui concerne l'extrait de pâte saturée, il conduit à l'établissement d'un *profil salin agronomique* dont la valeur et la signification sont très largement reconnues. Cependant on peut lui reprocher de ne pas provoquer la mise en solution de tous les sels présents dans l'échantillon, bien que, d'un autre côté, il favorise beaucoup moins l'hydrolyse des argiles sodiques que l'extrait 1/5.

Dans le cadre d'une étude pédologique du profil salin, on peut combiner les avantages respectifs de ces deux types d'approche (mise en solution de tous les sels + prise en compte des caractéristiques texturales et hydriques) en définissant un *profil salin potentiel corrigé* au point de saturation issu du profil salin potentiel 1/5 en utilisant la relation ci-dessous :

$$S_{pc} = \frac{500}{H_s} \times S_{1/5} \qquad (1)$$

où S_{pc} représente la salinité potentielle corrigée, H_s le taux d'humidité au point de saturation et $S_{1/5}$ la salinité de l'extrait 1/5.

Cette relation permet une expression de la *salinité potentielle*, pour l'humidité de saturation, par extrapolation des mesures effectuées sur l'extrait 1/5. Il s'agit d'une évaluation par excès de la *salinité agronomique* (mesure directe sur l'extrait de pâte saturée), cette dernière étant reliée aux salinités potentielles par les relations :

$$S_a = \frac{1}{k} \times \frac{500}{H_s} \times S_{1/5} \qquad (2)$$

$$S_{pc} = k \times S_a \qquad (3)$$

où k est un coefficient de proportionnalité que nous avons trouvé compris entre 1,3 et 1,6 pour divers sols salés du Roussillon et de la Camargue.

B. — *Échelle de salinité*

On dispose d'une excellente échelle agronomique de salinité, mise au point par l'U. S. Salinity Laboratory (1954), et exprimée en termes de conductivité de l'extrait de pâte saturée.

En ce qui concerne la signification agronomique des mesures effectuées sur l'extrait 1/5, elle est variable suivant la texture du sol, mais grâce à la relation (2) on peut se situer par rapport à l'échelle précédente quand on connaît approximativement les valeurs de H_s et de k.

Cette dernière échelle — qui varie de 0 à 16 mmhos — ne couvre cependant pas le domaine des fortes salinités très fréquentes dans les sols salés méditerranéens.

Aussi avons nous proposé, à des fins pédologiques (SERVANT, 1971), une échelle couvrant un éventail plus ouvert et comprenant 7 classes de salinité exprimée soit en fonction de la somme des anions ou des cations en méq./l, soit en fonction des la conductivité électrique en mmhos/cm, l'ensemble concernant l'extrait de pâte saturée.

Cette échelle permettra de situer le domaine de variation des différents profils salins présentés dans les pages suivantes.

TABLEAU I

Échelle de salinité pédologique concernant l'extrait de pâte saturée

Classes de salinité	Conductivité électr. mmhos/cm	Somme des ions me/l
0 : non salé	< 2,5	< 25
1 : faiblement salé	2,5 à 5	25 à 50
2 : moyennement salé...	5 à 10	50 à 106
3 : salé.....	10 à 15	106 à 166
4 : fortement salé.....	15 à 20	166 à 226
5 : très fortement salé..	20 à 27,5	226 à 316
6 : excessivement salé....	27,5 à 40	316 à 622
7 : hypersalé.....	> 40	> 622

C. — *Indices d'entraînement des sels et définition pédologique des profils salins*

Si s est la salinité moyenne de l'horizon appauvri en sels solubles et si S représente la salinité moyenne de l'horizon enrichi, l'indice d'entraînement des sels est défini par le rapport $I = 1/S/s$.

Quand on considère la salinité globale exprimée en termes de conductivité électrique L, l'indice $I_L = 1/L/l$.

Pour les différents anions et cations, on peut de même distinguer I_{Cl^-}, $I_{SO_4^{--}}$ $I_{HCO_3^-}$, $I_{CO_3^{--}}$, I_{Na^+}, $I_{Ca^{++}}$, $I_{Mg^{++}}$ qui permettent de comparer la mobilité relative des différents sels dans le profil.

Si, pour une période donnée, les horizons A (croûte de surface exceptée) sont appauvris en sels par rapport aux horizons B ou C, nous poserons que le sol présente un *profil salin de type descendant.*

Si, pour une période donnée, les horizons A sont enrichis en sels solubles par rapport aux horizons B ou C, nous poserons que le sol présente un *profil salin de type ascendant.*

Enfin, si d'une manière générale, la salinité des horizons A est très peu différente de celle des horizons B ou C, nous dirons que le profil salin n'est pas ou peu différencié.

D. — *Application à quelques profils*

Sur la figure 1, est représenté un profil salin de type descendant concernant un sol salé d'une dépression intérieure fermée du Roussillon (Villeneuve-de-la-Raho, avril 1972). Pour ce sol, le profil salin agronomique (P_a) déterminé par des mesures effectuées sur l'extrait de pâte saturée indique que les conditions de salinité sont très fortes (classe 5) dans l'horizon A et excessivement fortes (classe 6) dans les horizons (B) et C. Aucun végétal cultivé ne peut pousser dans de telles conditions (la végétation naturelle est constituée par des halophytes résistants).

Le profil salin potentiel (P_p 1/5), présente quant à lui un tracé descendant bien différencié, avec un indice I_L qui est de l'ordre de 1/1,5, mais ce tracé peut être in-

fluencé par des variations de texture qui sont traduites par les graphiques d'humidité. Aussi, en vue d'éliminer l'influence de ces variations, peut-on considérer le profil salin potentiel corrigé qui les intègre, et prend en compte tous les sels solubles.

On voit en effet que ce profil est encore de type descendant mais moins accru que dans le cas précédent ($I_L = 1/1,2$).

Sur la figure 2, il s'agit d'un profil salin ascendant (mai 1972) intéressant un sol argileux vertique dont la texture et les caractéristiques hydriques sont relativement

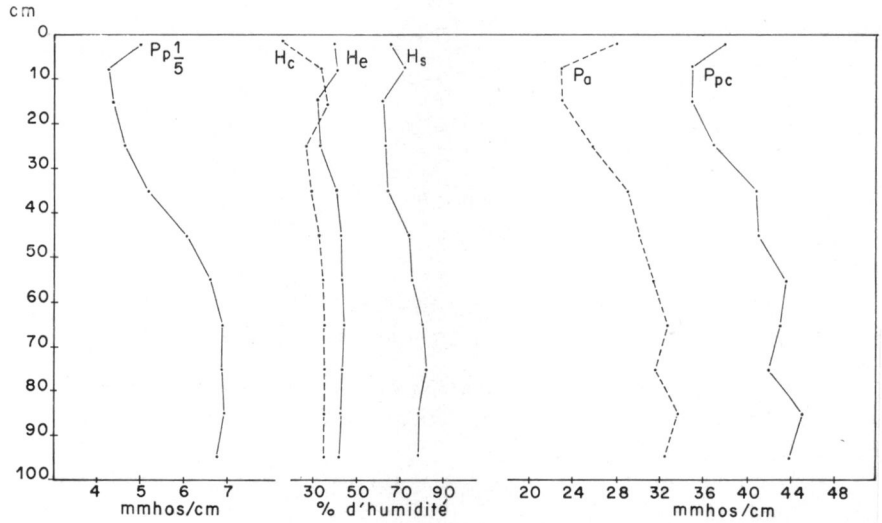


FIG. 1. — *Profil salin potentiel* (P_p 1/5), *profils d'humidité* (H_s : humidité de saturation ; H_e : humidité équivalente, H_c : humidité de terrain), *profil salin agronomique* (P_a) *et profil salin potentiel corrigé* (P_{pc})

Dépression salée de Villeneuve-de-la-Raho (66)

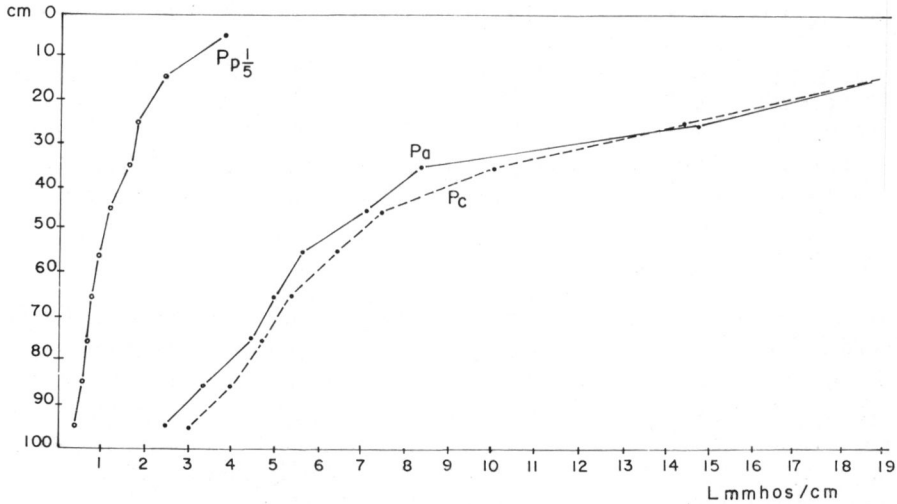


FIG. 2. — *Profils salins comparés pour un sol argileux de la dépression de Canohes* (66)

P_p 1/5 : profil salin potentiel, P_c : profil potentiel corrigé au point de saturation, P_a : profil agronomique (extrait de pâte saturée)

constantes le long du profil. Pour ce sol, dont le niveau de salinité est beaucoup plus faible que précédemment, on constate que les différents profils salins sont tout à fait comparables avec, en particulier, la quasi-identité du profil agronomique et du profil potentiel corrigé, ce qui signifie que dans ce cas la dissolution des sels est presque aussi complète dans l'extrait de pâte saturée que dans l'extrait 1/5, les faibles différences s'expliquant par une plus forte dissolution du gypse dans l'extrait 1/5.

Sur la figure 3 enfin, il s'agit d'un sol salé du domaine littoral, présentant de fréquentes variations de texture (prélèvements d'avril 1972).

Au vu du profil potentiel P_p 1/5, on pourrait conclure à l'existence d'un maximum de salinité entre 30 et 50 et d'un minimum entre 60 et 70 avec un indice I_L voisin de 1/1,3.

En traçant le profil potentiel corrigé, ces particularités disparaissent et on se trouve alors en présence d'un profil salin *peu différencié*, avec un indice I_L voisin de 1, se situant dans le domaine très fortement salé (classe 5).

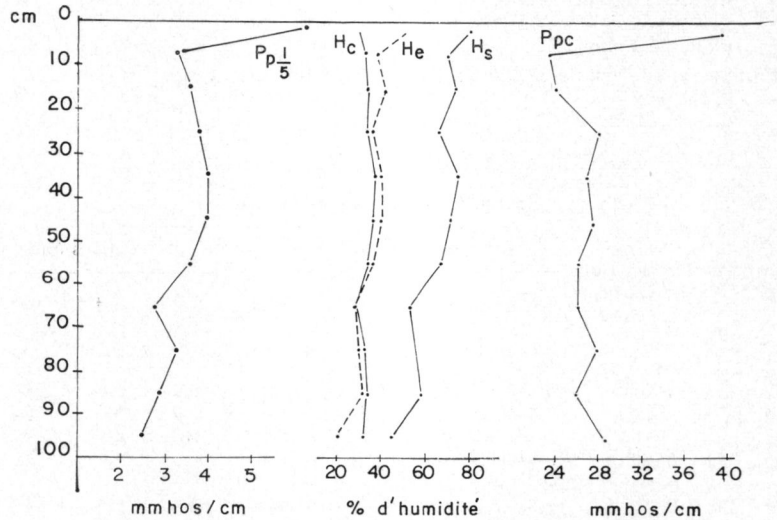


FIG. 3. — *Profil salin potentiel* (P_p 1/5), *profils d'humidité* (H_s : humidité de saturation, H_e : humidité équivalente, H_c : humidité de terrain) *et profil salin potentiel corrigé au point de saturation* (P_{pc})
Saint-Cyprien (66)

III. — ÉTUDE DU PROFIL SALIN D'ÉTÉ DE QUELQUES SOLS HALOMORPHES DU ROUSSILLON ET DE LA CAMARGUE

L'étude des sols salés de la plaine du Roussillon (SERVANT, 1970) nous a conduit à introduire le sens du gradient de salinité dans la définition des unités pédologiques et à distinguer les sols à salinité décroissante avec la profondeur et ceux qui étaient caractérisés par une salinité croissante avec la profondeur.

Cette différenciation en profils salins ascendant ou descendant était basée sur

des mesures concernant des échantillons prélevés en juillet 1969 et de ce fait, il s'agissait de valeurs d'été, point qui a d'ailleurs été précisé dans la notive explicative de la carte pédologique de France, feuille de Perpignan-Argelès/Mer.

Si l'existence d'un profil salin ascendant semble être une caractéristique normale, en saison sèche, des sols salés du littoral méditerranéen, il n'en est plus de même des profils salins de type descendant où le processus de salinisation semble contrarié. La cartographie nous a permis de constater, dans une première approximation, que les profils salins d'été de type descendant caractérisaient les dépressions salées du littoral et de la plaine présentant un mauvais drainage externe, c'est-à-dire périodiquement inondées après les fortes pluies d'automne et d'hiver.

TABLEAU 2

Caractéristiques des profils salins agronomiques pour des sols du Roussillon en juillet 1969

Profil salin de type ascendant : salobres du littoral :
1. Saint-Laurent-de-la-Salanque ;
2. Torreilles ;
3. Mas d'Uston.

Profil salin de type descendant : dépressions intérieures salées :
4. Bages ;
5. Montescot.

Salinité : extrait de pâte saturée

Profondeur (cm)	Conductivités (mmhos/cm)	Anions (méq./l)				Cations (méq./l)			
		Cl^-	$SO_4^{=}$	HCO_3^-	Somme	Na^+	Ca^{++}	Mg^{++}	
0-5	70	1 440	163	10	1 613	1 222	100	250	1
5-20	45	750	83	10	843	680	60	90	
20-50	41	620	69	10	699	544	50	85	
50-80	41	610	66	10	686	540	50	85	
0-20	31	385	62	8	455	305	90	60	2
20-40	27	350	38	4	392	265	65	50	
40-70	28	350	34	2	386	270	65	50	
70-100	28	340	25	2	367	268	45	40	
0-4	60	760	122	16	898	660	59	160	3
4-8	40	400	54	24	478	370	33	73	
8-15	30	300	50	17	367	290	32	47	
50-80	17	150	34	8,5	192,5	178	5	10	
80-100	19	160	36	8,5	204,5	186	6	12	
0-4	2,5	12,5	2,0	10	25	17,2	0,5	8,0	4
4-13	9,9	72	19,7	10	102	82,0	2,0	24,0	
13-25	13,0	107,5	26,5	7,5	131	104,0	5,0	20,0	
25-50	14,0	127,5	28,2	2,5	158	130,0	5,0	20,0	
50-80	15,2	129,0	30,0	3,7	162	146,0	2,5	15,0	
0-7	3,6	22	2,6	14	38	23	5,2	8,4	5
7-12	8,6	66	10,4	14	90	75	11,2	10,0	
12-50	13,6	130	17,0	10	157	140	11,4	5,4	
50-100	15,2	132	19,5	10,5	162	135	5,7	5,4	

En ce qui concerne les profils salins de type ascendant, les plus typiques étaient rencontrés dans les sols nus, dépourvus de végétation, avec un très haut niveau de salinité dans le cas des « sansouïres » de la zone à salicornes, et un niveau plus faible dans le cas des taches salées des prairies ou de la zone cultivée.

Le tableau 2 figurant plus haut, résume des données concernant cette première série d'investigations.

Partant de ces observations, on s'est proposé de poursuivre l'étude des profils salins en effectuant des prélèvements à diverses saisons, afin de suivre les fluctuations de la salinité. Il s'agit d'un objectif à moyen terme nécessitant plusieurs années de mesures et d'observations.

A plus court terme, on a voulu vérifier les résultats déjà acquis et préciser, par des prélèvements plus détaillés, les caractéristiques des profils salins d'été pour différentes catégories de sols du Roussillon et également de la Camargue. Ces dernières informations feront l'objet de la deuxième partie du mémoire où l'on distinguera successivement : les taches salées en zone cultivée, les zones d'engane et de sansouïre, les dépressions intérieures fermées.

On n'entrera généralement pas dans le détail de la distribution qualitative des divers sels solubles, notre approche se situant ici au niveau de la salinité globale, exprimée par la conductivité électrique des extraits aqueux de sols.

A. — *Cas des taches salées dans la zone cultivée*

Les taches salées de la zone cultivée, en Languedoc-Roussillon et en Camargue, se manifestent par l'absence ou le nanisme de la végétation et par l'apparition d'efflorescences salines à la surface du sol. Elles ont une distribution sporadique en liaison avec des particularités pédologiques, hydrologiques et topographiques. Leur impor-

TABLEAU 3

Caractéristiques détaillées d'un profil salin ascendant (Canohes 66)
Le niveau de salinité est fort en surface, moyen, puis faible en profondeur

Profondeur cm	Conductivité (mmhos/cm)		Anions et cations méq./l (extrait 1/5)					
	Ex. 1/5	Ex. pâte saturée	Cl^-	$SO_4^=$	HCO_3^-	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}
0-10	3,8	22,5	19,6	19,5	4,2	31,6	9,1	3,8
10-20	2,4	18,5	8,0	9,2	3,3	15,0	3,4	1,1
20-30	1,8	14,7	5,5	6,2	3,6	13,2	2,0	0,7
30-40	1,6	8,3	5,5	4,7	2,9	8,5	1,4	0,6
40-50	1,2	7,1	2,0	3,1	2,7	6,9	0,8	0,5
50-60	1,0	5,6	2,0	2,4	3,3	6,1	0,1	0,3
60-70	0,8	4,9	2,0	3,0	3,1	6,0	0,6	0,5
70-80	0,7	4,5	2,2	2,2	3,0	5,2	0,6	0,3
80-90	0,6	3,4	0,8	1,2	3,0	3,1	1,3	0,3
90-100	0,4	2,6	0,5	0,9	3,3	2,3	1,3	0,4

tance va grandissant dans certains secteurs de Camargue où le blé et la luzerne ont succédé au riz.

L'examen des profils salins, effectués en avril et en juillet 1972, révèle une distribution ascendante bien caractérisée, la salure étant surtout importante dans la partie supérieure du profil et pouvant être très faible dans les horizons sous-jacents. Ceci pourrait expliquer le maintien de la vigne, dans certaines taches étincelantes de sel, les racines trouvant en profondeur, une salinité acceptable.

Ces profils salins typiquement ascendants, sont explicités dans le tableau 3 et le tableau 4.

Dans le premier cas, il s'agit d'une tache salée dans une prairie artificielle de la cuvette de Canohes dans les Pyrénées-Orientales. En se référant à l'échelle de salinité (tabl. 1), on peut voir que celle-ci est surtout forte dans les 30 premiers centimètres alors qu'elle devient faible en profondeur.

Dans le second cas, on se trouve en présence de sols de Camargue et, comme on peut le voir, la distribution est assez régulièrement ascendante. L'interprétation agronomique de la salinité est ici beaucoup moins commode, car les mesures de conductivité concernent l'extrait aqueux 1/5.

TABLEAU 4

Profils salins ascendants dans des taches salées de la zone cultivée en Camargue (avril 1972)

La conductivité électrique est celle de l'extrait 1/5.
1 : prairie, 2 : céréales, 3 et 4 : luzerne

Tache 1		Tache 2		Tache 3		Tache 4	
Profondeur (cm)	Conductivité (mmhos/cm)	Profondeur (cm)	Conductivité (mmhos/cm)	Profondeur (cm)	Conductivité (mmhos/cm)	Profondeur (cm)	Conductivité (mmhos/cm)
0-7	2,48	0-7	5,0	0-7	5,6	0-7	6,6
7-15	1,11	7-15	3,4	7-15	3,0	7-15	3,8
15-22	0,83	15-22	3,3	15-22	2,6	15-22	4,2
22-30	0,49	22-30	3,3	22-30	2,2	22-30	4,0
30-37	0,40	30-37	2,6	30-37	1,7	30-37	3,9
37-45	0,41	37-45	2,6	37-50	1,5	37-45	3,5
45-52	0,35	45-52	1,8	50-60	1,3	45-52	3,4
52-65	0,29	52-60	2,0	60-70	1,3	52-60	3,4
65-80	0,27	60-70	1,3	70-80	1,2	60-70	2,5
		70-80	1,3				
		80-90	1,3				

B. — *Les zones d' « engane » et de « sansouïre »*

Dans le Midi de la France, le terme « engane » désigne la végétation halophile formée principalement de salicornes. Par extension, il désigne également le terrain colonisé par des salicornes et c'est cette dernière définition que nous retiendrons.

Le mot sansouïre concerne plus spécifiquement de larges plages nues où aucune végétation ne peut se développer tant le degré de salinité est élevé.

Quant au mot « salobre », il désigne, en Roussillon, toutes les manifestations de la salinité.

1. *Littoral du Roussillon.*

Les profils salins représentés sur la figure 4 intéressent trois sols halomorphes du Roussillon.

La station U, se situe dans la région de Saint-Cyprien (Mas d'Uston). Il s'agit d'une engane « ouverte » *à Salicornia, Obione et Statice.*

La station B est implantée dans la région du Bourdigou, en Salanque. Le profil B_1 caractérise une tache nue sans végétation alors que le profil B_2, situé à quelques mètres correspond à une pelouse à graminées et halophytes dont la végétation est touffue et recouvrante.

L'examen des graphiques permet de constater le caractère nettement ascendant des profils salins pour les sols U_1 et B_1 alors qu'il montre un profil salin de type descendant pour le sol B_2, dont le niveau de salinité est d'autre part moins important que pour le sol de sansouïre situé à quelques mètres.

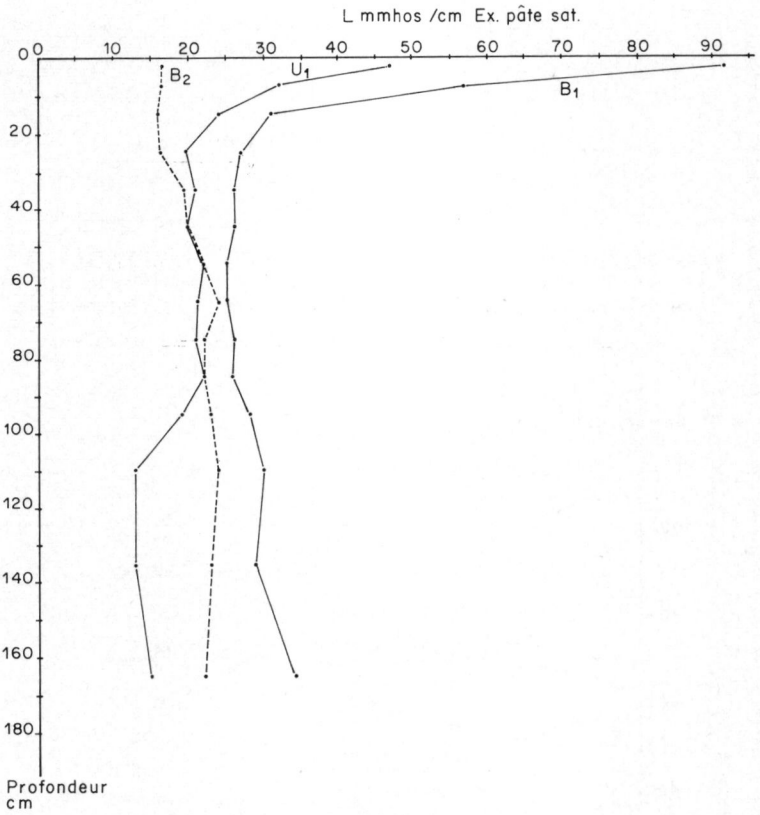


FIG. 4. — *Profils salins agronomiques pour trois sols halomorphes de la zone littorale du Roussillon* (juillet 1972)

B_1 : Sansouïre
U_1 : Engane ouverte
B_2 : pelouse

Ceci met en évidence le fait que la distribution des sels doit varier en fonction de l'importance du recouvrement végétal, et que les profils de type ascendant vont de pair principalement avec les sols nus ou peu colonisés par les végétaux, alors que des profils salins de type descendant se rencontrent quand la végétation est dense.

L'aspect de la surface du sol est d'ailleurs différent ; glacé et tassé au niveau de la sansouïre, il est pulvérent sous pelouse.

2. *Camargue.*

A côté de profils salins typiquement ascendants caractérisant différentes taches salées, l'étude d'une engane périodiquement inondée dont on a suivi les variations saisonnières de salinité (SERVANT, 1971) permet de mettre en évidence, pour ce sol très fortement salé, un profil salin de type descendant dont les caractéristiques en juillet et septembre 1972 sont représentées sur le tableau 5.

TABLEAU 5

Profils salins en été 1972 pour un sol halomorphe d'une engane périodiquement inondée
(Camargue, Mas du Grand-Manusclat)
Mesure sur extrait de pâte saturée

Conductivité (mmhos/cm)	Profondeur (cm)					
	0-10	10-30	30-50	50-75	75-100	100-120
Juillet 72.....	32,9	20,4	37,2	42,0	76,7	68,5
Septembre 72.....	44,3	28,0	36,6	51,2	68,2	65,0

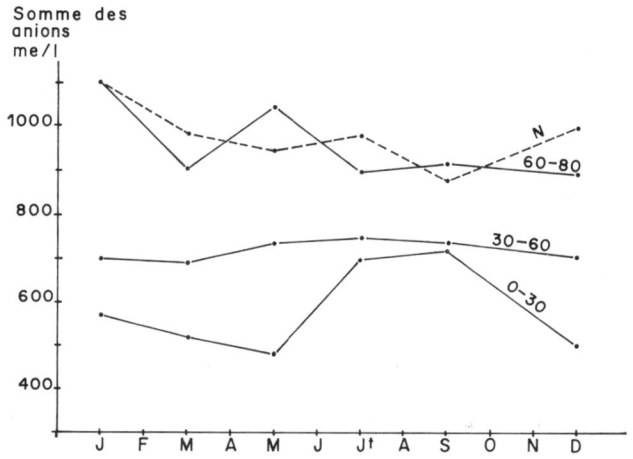


FIG. 5. — *Variations saisonnières* (1971) *de la salinité* (extraits de pâte saturée) *pour trois horizons du sol d'engane inondée.*
On a également représenté les variations de salinité de la nappe N)

Exception faite de la croûte de surface, on constate que la salinité augmente avec la profondeur. Cette distribution saline est la conséquence d'inondations hivernales qui recouvrent le sol chaque année pendant deux ou trois mois. Le processus de salinisation est de ce fait contrarié, bien que le niveau général de salinité reste très élevé.

C. — *Les dépressions intérieures du Roussillon*

Il s'agit de zones basses situées souvent à l'intérieur des terres et correspondant à d'anciens étangs saumâtres dont les alluvions renferment une nappe de profondeur et de salinité variables suivant le cas.

A un pôle, on trouve la dépression très salée — véritable « Chott » ou « Sebkrah » — de Villeneuve-de-la-Raho (tabl. 6), qui est recouverte par des eaux d'inondation pendant plusieurs mois chaque année. La végétation est formée par des roseaux dans les zones les plus humides et par des halophytes dans les secteurs les plus salés.

A l'autre pôle se situent des dépressions cultivées : Nyls et Canohes. Entre ces deux tendances, d'autres dépressions sont occupées par de mauvaises prairies à faciès salé : Bages, Montescot, Canet.

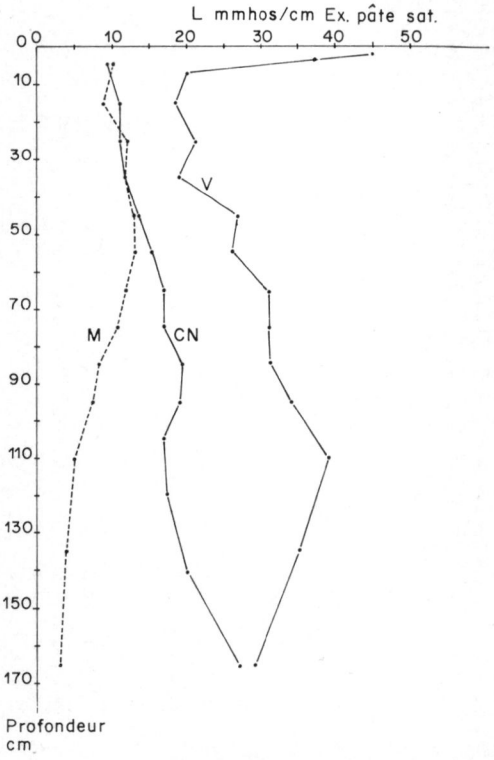


FIG. 6. — *Profils salins agronomiques pour trois sols halomorphes des dépressions intérieures du Roussillon* (juillet 1972)

M : Montescot
CN : Canet
V : Villeneuve-de-la-Raho.

TABLEAU 6

Caractéristiques des profils salins
pour un sol de la dépression salée de Villeneuve-de-la-Raho (66) *à deux périodes de 1972*
Les analyses détaillées concernent les échantillons prélevés au printemps

Profondeur (cm)	Cations et anions me/l									Conductivité (mmhos/cm)		
	Chlorures		Sulfates	Bicarbonates	Sodium		Calcium	Magnésium		Printemps		Été
	1/5	Pâte	1/5	1/5	1/5	Pâte	1/5	1/5	Pâte	1/5	Pâte	
0-3	32,4	299	12,7	1,4	31,2	240	6,0	5,8	72	5,09	27,9	45,7
3-10	30,6	232	5,1	1,8	30,4	212	1,8	1,6	50	4,34	23,0	20,3
10-20	31,4	229	3,0	1,7	32,5	226	1,8	1,4	32	4,39	23,1	18,5
20-30	31,6	279	4,1	1,6	36,0	246	1,8	1,4	42	4,69	26,2	21,0
30-40	38,4	314	3,2	1,6	44,0	280	1,4	1,7	41	5,25	29,0	19,0
40-50	45,4	326	5,8	1,5	47,5	300	1,2	1,9	42	6,10	30,1	26,7
50-60	54,4	346	6,2	1,5	50,0	334	1,4	1,4	37	6,56	31,7	26,0
60-70	54,6	361	8,0	1,4	51,2	300	1,2	1,6	40	6,93	32,7	30,7
70-80	55,6	342	8,0	1,5	51,2	310	1,2	1,5	34	5,89	31,8	30,7
80-90	58,6	374	8,0	1,3	55,0	322	1,2	1,4	35	7,09	33,5	31,3
90-100	53,6	370	5,1	1,3	48,0	305	1,2	1,4	35	6,80	32,6	34,0

Sur la figure 6, on a représenté trois profils salins d'été correspondant aux dépressions de Villeneuve-de-la-Raho, Canet et Montescot, les stations étudiées présentant les caractéristiques suivantes :

(V) : Villeneuve-de-la-Raho : sol nu dans une zone d'halophytes,

(CN) : Canet : pelouse à *Hordeum maritimum*, *Juncus* et *Statice*,

(M) : Montescot : pelouse à *Plantago crassifolia*, *Hordeum maritimum* et *Lotus corniculata*.

Le profil CN est le plus simple des trois, car il présente un tracé assez régulier de type descendant, conforme à ce qui avait déjà été trouvé dans ce type de sol. Le niveau de salinité est assez élevé, mais la conductivité de l'extrait de pâte saturée reste en général inférieure à 20 mmhos sur l'ensemble du profil.

Le profil V est également de type descendant, mais il offre deux particularités : une croûte de surface très salée et un maximum de salinité entre 100 et 120 cm de profondeur. D'autre part, le degré de salinité de ce sol reste très élevé.

Dans le cas du profil M, on se trouve manifestement en présence d'un profil de type ascendant dans sa partie inférieure et descendant dans sa partie supérieure. Le degré de salinité enregistré est le plus faible des trois profils.

IV. — RELATIONS ENTRE LE PROFIL SALIN ET LE STADE D'ÉVOLUTION PÉDOGÉNÉTIQUE

L'existence, dans les dépressions intérieures et dans certaines zones d'enganes littorales, de profils salins de type descendant — et ce, au cœur de la saison sèche — conduit à penser que cette distribution saline particulière constitue une caractéristique assez constante, traduisant le fait que le processus naturel de salinisation est contrarié par des actions antagonistes (désalinisation) d'origines naturelle ou anthropique.

Tant que la salinité reste suffisamment élevée, cette caractéristique a peu d'importance sur l'évolution pédogénétique en ce sens que les solutions salines fortement concentrées maintiennent les argiles floculées et que le sol reste de type solontchak, même si son complexe absorbant — de par la nature fortement sodique des solutions salines — possède un taux élevé de sodium échangeable (ce taux varie de 15 à 60 p. 100 de T et on parle de solontchak sodique ou sol salin à complexe sodique (SERVANT, 1970).

Par contre, quand le processus de désalinisation devient dominant et que la salinité s'abaisse fortement, la charge en électrolytes peut devenir insuffisante pour maintenir une structure convenable, on assiste alors à la défloculation de l'argile. La structure est dégradée et le sol appartient au type salé à alcali.

De tels sols ont été caractérisés dans la plaine du Roussillon dans les dépressions intérieures, où ils présentent un profil salin descendant avec un niveau de salinité qui n'est jamais très haut (voir tabl. 2 et fig. 6).

Le profil salin de type descendant, qui traduit la dominance du processus de désalinisation, semble donc constituer une *caractéristique permanente* des sols halomorphes plus évolués, l'atténuation de plus en plus marquée de la salinité conduisant au sol à alcali et au solonetz.

TABLEAU 7

Caractéristiques principales des processus d'halomorphie des sols et des paysages dans une séquence intéressant les marais et basses plaines maritimes du littoral français

Profils salins	Processus	Situation géographique	Niveau de salinité	Catégories de terrains	Végétation et cultures	Classification pédologique
Profil salin de type ascendant	*Salinisation dominante* sous l'effet — de submersions marines rythmées	Littoral atlantique, Manche, mer du Nord.	Fortement à hypersalé	Slikke (sables et vases)	Sol nu : pas de végétation	Sols minéraux bruts d'apport marin
				Schorre (tangues)	Halophytes : *Salicornia, Arthrocnemum, Salsola, Statice, Obione, Suaeda*, etc.	Sols salins à complexe sodique
	— d'une nappe salée peu profonde sous climat méditerranéen	Littoral méditerranéen (Camargue, Languedoc, Roussillon)		Sansouïre, engane et Salobre (sur alluvions fluvio-lagunaires). Taches salées		
Profil salin de type descendant	*Salinisation contrariée* — par des inondations de saison froide		Moyennement à hypersalé	enganes et dépressions inondables		
	Désalinisation dominante sous l'effet — d'inondations de saison froide		Moyennement à fortement salé	Marais et sagnes	Joncs et phragmites	Sols salés à alcali, protosolonetz, sols à gley salés
	— de submersions de saison chaude			Rizières	Riziculture en Camargue	
	— de travaux d'assainissement et de mise en valeur			Anciens marais dépressions salées	Prés salés, prairies	
	Désalinisation dominante sous l'effet — du climat atlantique — du régime des marées — des travaux d'assainissement	Marais et polders atlantiques (Médoc, Marais rochefortais et poitevin)		Bri, palus et mattes (alluvions fluvio-marines)	Prés salés, prairies Céréales	
Absence de profil salin	*Désalinisation totale* sous l'effet — du climat maritime, — du régime des marées, — des travaux d'assainissement	Plaine maritime du nord de la France (Wateringues et Moeres)	Salinité très faible à nulle	Chenaux sableux « argiles » des polders (alluvions marines) tourbes	Céréales, prairies, betteraves, chicorée, cultures légumières, etc.	Sols à gley Sols alluviaux hydromorphes Sols tourbeux

Si l'on quitte le midi de la France et que l'on examine les sols salés du littoral atlantique (CALLOT et FAVROT, 1965 ; MORIZET *et al.*, 1970), on constate que les profils salins de type descendant sont les plus fréquents. Ils traduisent une tendance naturelle à la désalinisation sous l'influence du climat océanique à pluviométrie plus régulièrement répartie. L'influence des travaux d'assainissement et de mise en valeur y est également importante. Ces sols sont classés parmi les sols salés à alcali pour certains d'entre eux et parmi les gleys pour d'autres. Enfin, si l'on considère certains sols de la plaine maritime du nord de la France qui ont été submergés par l'eau de mer en 1944 — et ce, pendant plusieurs mois — on ne peut à l'heure actuelle que constater l'absence de profil salin, ce qui montre que, dans cette région, les processus de salinisation sont entièrement dominés, les sols étant classés comme hydromorphes à gley ou pseudogley (SERVANT et BARTHES, 1972).

Ces différentes données sont résumées sur le tableau 7 où l'on présente une séquence de sols en milieu halomorphe dans le cas des marais et basses plaines maritimes du littoral français. Le concept de profil salin prend ici une valeur moyenne et ne concerne pas uniquement les mois d'été.

CONCLUSIONS

Après avoir défini le concept de profil salin et présenté un exposé critique de son approche analytique (profil salin potentiel, profil salin agronomique, profil salin potentiel corrigé), on a voulu montrer son intérêt pour une étude globale, dynamique et évolutive des phénomènes d'halomorphie :

— globale, car il fournit une information détaillée sur la distribution quantitative et qualitative des sels dans le sol ;
— dynamique, car il renseigne sur le mouvement des sels dont il permet de suivre les variations saisonnières ;
— évolutive, car en tant que résultante des phénomènes antagonistes desalinisation et de désalinisation, il sert à caractériser le degré d'évolution pédologique dans une séquence en milieu halomorphe.

En ce qui concerne le sens des gradients de salinité (profils salins ascendant ou descendant), il peut intervenir dans la définition d'une unité de sol à partir du moment où il constitue une caractéristique permanente, ce qui semble prouvé pour certaines stations et reste à vérifier pour d'autres.

Dans la recherche des causes de tel ou tel gradient de salinité, le régime des eaux superficielles (présence ou absence d'inondations périodiques) ainsi que le degré de couverture végétale du sol semblent constituer deux facteurs importants.

Des travaux sont en cours, qui visent à préciser ces points. On étudie également la dynamique comparée des différents anions et cations.

Reçu pour publication en décembre 1972.

SUMMARY

SALT PROFILES OF SOILS : INVESTIGATIONAL METHODS AND LEVEL OF SIGNIFICANCE APPLICATION TO HALOMORPHIC SOILS IN SOUTHERN FRANCE

The saline profile is defined as a result of opposed salinization and desalinization processes. In section I the analytical approach is commented upon and some concepts relating to salt profiles are set forth : potential, agronomical, upward or downward, slightly differentiated saline profiles.

In section II are investigated a number of summer time saline profiles in halomorphic soils of Roussillon and Camargue (Southern France) by differenciating salt patches in cultivated land, coastal halophyte areas and inner salt depressions.

It is found that summer time upward saline profiles feature the barren soils of the salt patches in cultivated land and the very saline spots called « sansouire » in the halophyte mediterraean coast area. These soils are classified as sodic solontchaks.

The downward type of saline profiles were noted in soils covered with dense vegetation of halophytic sward and in areas where surface drainage is poor, a typical example of which are the inner depressions in Roussillon. In these periodically flooded salt depressions the downward type of saline profile is a permanent feature and the soil evolving through desalinization is classified in the saline alkali group.

ZUSAMMENFASSUNG

SALZPROFIL DER BÖDEN UNTERSUCHUNGSVERFAHREN UND BEDEUTUNG ANWENDUNG BEI HALOMORPHEN BÖDEN IM SÜDLICHEN FRANKREICH

Nach Festsetzung des Salzprofils als eine Resultante der entgegenwirkenden Salzungs- und Entsalzungsverfahren wird in einem ersten Teil eine kritische Darstellung seine analytischen Annäherung vorgenommen. Man stellt die Begriffe des potentiellen Salzprofils und des potentiellen korrigierten Salzprofils, sowie die Begriffe aufsteigender, absteigender und wenig differenzierter Bodensalzprofile dar.

In einem zweiten Teil wird eine Untersuchung der verschiedenen Sommersalzprofile der holomorphen Böden des französischen Roussillon und der Camargue vrgenommen, indem die folgenden Fälle voneinander unterschieden wurden : Salzflecke des angebauten Gebietes, halophyte Küstengebiete, innere Salzvertiefungen.

Es wurde festgestellt dass, die Sommersalzprofile des aufsteigen Typs die unbewachsenen Böden der Salzflecke oder des « sansouïres » charakterisieren.

Die Bodensalzprofile des absteigenden Typs wurden in dem Falle beobachtet wo Böden von einer sehr buschigen « Salicorne » (eine Sorte von Gänsefuss) — Vegetation besiedelt sind, sowie in Gebieten mit schlechter Aussensdranierung, wofür die inneren Salzvertiefungen des Roussillons ein Beispiel bilden.

In diesen periodisch überfluteten Vertiefungen erscheint der absteigende Typ gleich einer ständigen Charakteristik, und der sich durch Entsalzung entwickelnde Boden gehört zum Typ alkalischen Zalzes.

РЕЗЮМЕ

Солевой профиль почв. Методы изучения и значение. Применение к галоморфным почвам юга Франции.

Ж. СЕРВАН.

Определив солевой профиль как результат антагонистических процессов засоления и рассоления, автов представляет в первой части данного труда, критический отчет о своем аналитическом подходе к вопросу и рассматривает понятия потенциальных, сельскохозяйственных, потенциальных исправленных, восходящих, нисходящих и мало выраженных солевых профилей.

Вторая часть — посвящена изучению летних солевых профилей галоморфных почв Русийона и Камарга, в которых существуют следующие различия : пятна засоления в зонах культуры, галофитные приморские зоны, внутренние засоленные депрессии. Отмечается что летние солевые профили восходящего типа характеризуют голые почзы пятен засоления, называемые «сансуирами».

Солевые профили нисходящего типа наблюдаются в почвах занятой густой растительностью солеросов, и в зонах неразвитого внешнего дренажа, примером которых могут служить внутренние засоленные впадины Русийона. В этих периодически затопляющихся депрессиях солевой профиль нисходящего типа является постоянной характерной чертой и почва, эволюция которой происходит при помощи рассоления, представляет тип соленой щелочной почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CALLOT G., FAVROT J.-C., 1965. *Étude pédologique des marais du Médoc.* S. E. S. nº 34. Service d'Étude des Sols. E. N. S. A., 34060 Montpellier.

MORIZET J., DEJOU J., GUYOT J., 1970. Principales caractéristiques physico-chimiques des sols de types vertique et sodique dans le marais Rochefortais à Saint-Laurent-de-la-Prée (Charente-Maritime). *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **5**, 11-24.

SERVANT J., 1970. Étude expérimentale de l'influence des conditions salines sur la perméabilité des sols : conséquences pédologiques. *Sci. Sol*, **2**, 87-101.

SERVANT J., CHOHAN T., 1970. Notice explicative de la carte pédologique au 1/100 000. Feuille Argelès-sur-Mer, Perpignan. *Service d'Étude des Sols et de la Carte pédologique de France*, I. N. R. A., Versailles.

SERVANT J., 1971. Sur les sols sodiques de Camargue. Variations saisonnières de la salinité des sols et des nappes : premiers résultats. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol*, **6**, 23-31.

SERVANT J., 1971. Les sols des marais et basses plaines maritimes. In : *Sols, Paysages et aménagements*, 25-35. Service d'Étude des Sols. E. N. S. A. 34060-Montpellier.

SERVANT J., BARTHES J. P., 1972. *Étude pédologique des wateringues du Nord-Pas de Calais.* S. E. S., I. N. R. A., Montpellier.

U. S. SALINITY LABORATORY STAFF, 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* U. S. Department of Agriculture.

Ann. agron., 1973, **24** (3), 395-396.

RECTIFICATIF A PROPOS DE L'ARTICLE « ÉTUDE DU MICROCLIMAT LUMINEUX DANS LA VÉGÉTATION » PARU DANS LES *ANNALES AGRONOMIQUES*, 1966, **17** (5), 571-602

P. CHARTIER

Station centrale de Bioclimatologie,
Centre national de recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

Le calcul de la surface des taches de soleil dans le cas du couvert hétérogène et dense (§ 213 de l'article cité en référence) est traité d'une manière erronée. Rappelons qu'un couvert a été défini, dans cet article, comme étant hétérogène et dense si toutes les inclinaisons et les azimuts des éléments de feuille sont également probables. C'est une approximation utilisable dans certaines forêts denses par exemple.

La surface relative des taches de soleil s dépend bien de l'indice foliaire f selon la relation :

$$s = e^{-k(h)f} \tag{1}$$

mais l'expression suivante du coefficient $k_{(h)}$ indiquée dans le texte est inexacte :

$$k_{(h)} = \frac{2}{\pi \sin h} \tag{2}$$

On a supposé, pour obtenir la relation (2), que la projection $\Delta f'$ de la surface foliaire d'une petite couche Δf sur un plan perpendiculaire aux rayons du soleil ne dépendait pas, dans le cas d'un couvert hétérogène et dense, de la direction des rayons solaires directs :

$$\Delta f' = \frac{2}{\pi} \Delta f \tag{3}$$

Cette hypothèse est inexacte, $\Delta f'$ dépend en fait de h. Pour s'en convaincre, il suffit de revenir au § 212 de l'article en question. En effet, pour une couche de feuilles d'inclinaison constante, la projection $\Delta f'$ de la surface foliaire Δf sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires, est donnée par :

$$\Delta f' = M(i, h)\, \Delta f ; \tag{4}$$

où $M(i, h) = \cos i \sin h$, si $i \leqslant h$;

$M(i, h)$ prend une valeur indiquée figure 9 de l'article en question si $i > h$.

Pour un couvert composé d'éléments de feuilles d'inclinaisons variables, l'ombre portée des feuilles d'inclinaison i sur un plan perpendiculaire aux rayons solaires directs soit $\delta f'$ est telle que :

$$\delta f' = q_i \, M_{(i,h)} \, \Delta f \tag{5}$$

où q_i est la fréquence des éléments de feuille de la couche Δf inclinés selon l'angle i.

Si l'on suppose, en outre, qu'il n'y a pas de superposition d'éléments de feuille par rapport aux rayons solaires directs dans la couche élémentaire Δf, l'ombre portée de toutes les feuilles de la couche est fournie par la relation suivante :

$$\Delta f' = \Sigma \, \delta f' = \sum_i (q_i \, M_{(i,h)} \, \Delta f) \tag{6}$$

Dans le cas du couvert hétérogène et dense, toutes les inclinaisons étant équiprobables, la fréquence q_i est égale à $\frac{1}{9}$ si l'on répartit les éléments de feuille en 9 classes de 10°.

Par un raisonnement analogue à celui du § 212, le coefficient $k_{(h)}$ de la relation (1) devient :

$$k_{(h)} = \frac{\sum_i (q_i, M_{(i,h)})}{\sin h} \tag{7}$$

Le tableau I fournit les valeurs de $k_{(h)}$ calculées grâce aux relations (2) et (7). Les valeurs sont égales lorsque le soleil est au zénith. C'est pourquoi la suite de l'article (§ 213 *b* et *c*) dans laquelle seul ce cas était pratiquement envisagé n'est pas remise en cause.

TABLEAU I

Valeurs de k_h

Hauteur du soleil h	5	15	25	35	45	55	65	75	85
$k_h = \frac{2}{\pi \sin h}$	7,30	2,46	1,51	1,11	0,90	0,78	0,70	0,66	0,64
$k_h = \frac{\sum_i (q_i M_{(i,h)})}{\sin h}$	4,70	1,68	1,11	0,89	0,78	0,71	0,67	0,65	0,64

L'auteur prie les lecteurs qui se seraient appuyés sur le résultat incriminé dans leur propre travail de bien vouloir accepter ses excuses.

Reçu pour publication en octobre 1972

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHARTIER Ph., 1966. Étude du microclimat lumineux dans la végétation *Ann. agron.*, **17** (5), 571-602.

Ann. agron., 1973, **24** (3), 397-400.

CHRONIQUE DES LIVRES

BAVER (L. D.), GARDNER (W. H.), GARDNER (W. R.). — SOIL PHYSICS. — New York, John Wiley and Sons, 4e éd., 1972, 498 pages.

Cet ouvrage traite de tous les aspects des propriétés physiques des sols (propriétés colloïdales, viscosité, dynamique des sols, structure) et des phénomènes physiques dans les sols en relation avec l'aération, la température, l'eau (rétention, mouvement, bilan hydrique) et de leurs applications (relations eau du sol — plantes, assainissement et drainage) et enfin de l'érosion (par l'eau et le vent).

Cette 4e édition comprend des additions et des remaniements : une plus grande importance est donnée à l'eau du sol au point de vue théorique, la rétention et le mouvement de l'eau dans le sol sont présentés et interprétés en termes de bilan hydrique.

Dans le chapitre I, l'importance de la minéralogie des argiles sur les propriétés physiques et colloïdales des sols est soulignée. La structure du sol est traitée en 2 chapitres, du fait de l'addition de nouvelles considérations sur les conséquences agronomiques (ameublissement, développement des racines, croissance des végétaux). De même le chapitre concernant la température du sol a été révisé pour approfondir les questions de bilan thermique.

J.-L. G.

WIT (C. T. de), VAN KEULEN (H.). — SIMULATION OF TRANSPORT PROCESSES IN SOILS. — Wageningen, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1972, 100 p.

Cette étude est le fruit d'un travail mené en commun par des chercheurs et des étudiants de Wageningen. Son but est l'étude des phénomènes de transports de chaleur, de sels, d'ions et d'eau dans la phase non-saturée du sol. Ces phénomènes sont caractérisés par une modification simultanée de la quantité d'énergie ou de matière avec le temps et l'espace. En mathématiques, de tels systèmes distributifs représentés par des équations différentielles partielles sont difficiles à résoudre, ce qui a conduit à l'utilisation d'ordinateur.

Pour lire ce livre avec profit, outre des solides connaissances de pédologie et mathématiques, il sera nécessaire d'acquérir des bases de FORTRAN. Le programme choisi est le langage CSMP (Continuous System Modeling Program), utilisé par IBM pour ses ordinateurs 360.

Après une brève introduction exposant quelques principes des phénomènes de transport, l'ouvrage comporte 5 chapitres (flux de chaleur, transport d'un sel, diffusion des ions, transport des ions dans le sol, infiltration de l'eau dans le sol), construits de la même façon : pour chaque phénomène, les équations de bases sont détaillées en posant toutes les conditions nécessaires, puis le programme est établi et des exemples de sortie d'ordinateurs sont commentés.

J.-L. G.

GANSSEN (R.). — BODENGEOGRAPHIE MIT BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER BÖDEN-MITTELEUROPAS. — Géographie du sol, avec référence spéciale sur les sols d'Europe centrale. (en allemand). Stuttgard, K. F. Koehler Verlag, 1972, 325 p., 2e éd.

Cet ouvrage, se situe dans un domaine intermédiaire entre la géographie et la pédologie. Une première partie (121 p.) porte sur la géographie du sol en général et les lois de formation des sols et comprend deux sections :

1° Les facteurs de la pédogenèse et du développement en tant que générateurs de types de sols,

2° Répartition de sols typiques suivant les zones climatiques de la terre.

La seconde partie (136 p.) est consacrée à l'étude de la répartition et de l'utilisation des principaux types de sols dans quelques continents. Un peu plus de la moitié de cette partie traite des sols d'Europe (dont un chapitre particulier sur les sols d'Europe centrale). La seconde moitié se subdivise en sols d'U. R. S. S. et d'Asie, de l'Afrique, de l'Australie et des continents américains.

Cette deuxième édition, paraissant 14 ans après la première, a été profondément remaniée et complétée en de nombreux domaines où les connaissances ont beaucoup évolué, comme par exemple les minéraux des argiles, les substances humiques ou les processus de formation des sols.

Un nouveau chapitre, de Z. GRACANIN, a été ajouté dans la deuxième partie de l'ouvrage sur les sols des Alpes.

Outre une importante bibliographie (50 p.) classée à la fin de l'ouvrage dans l'ordre des paragraphes de chaque chapitre, cette nouvelle édition comporte un index matière. De nombreux tableaux et figures illustrent le texte, tandis qu'une annexe regroupe les cartes et illustrations photographiques.

J. L. G.

MORTVEDT (J. J.), éd. — MICRONUTRIENTS IN AGRICULTURE. — Proceedings of a symposium held at Muscle Shoals, Alabama, April 20-22, 1971. Soil Science Society of America, Madison (Wisconsin), 1972, 666 p.

L'objet de ce Symposium était l'étude des oligo-éléments dans les sols et les engrais et leurs relations avec la nutrition des plantes, des animaux et de l'Homme.

Cet ouvrage rassemble les 24 articles présentés au cours de ce Symposium, que l'on peut regrouper de la manière suivante :

— Études des oligo-éléments dans les sols (géochimie, équilibre, adsorption, réactions avec les substances organiques, extraction).

— Études de leurs relations avec les plantes (absorption, translocation, fonctions physiologiques, interactions, concentration dans les tissus, carences et toxicité).

— Études des oligo-éléments en relation avec les engrais (utilisation, préparation, réactions chimiques, efficacité agronomique).

Outre ces 3 grands thèmes qui représentent la plus grande partie de cet ouvrage, un article traite de la répartition géographique des oligo-éléments principalement aux États-Unis, en relation avec les problèmes de toxicité ou carence chez les plantes, les animaux qui s'en nourrissent et éventuellement des conséquences pour l'Homme.

Un article est consacré aux oligo-éléments dans l'alimentation animale et un autre à la pollution de l'environnement (air, eau, sols, plantes, aliments, Homme) par le plomb, le mercure et le cadmium.

Chaque article est suivi d'une bibliographie ; la liste des participants au symposium figure en tête de cet ouvrage, qui comprend une table de facteurs de conversions des unités de mesure anglaises en unités du système métrique (et réciproquement), un glossaire des noms et abréviations utilisés pour les engrais ainsi que des noms communs et scientifiques des plantes, enfin un index par sujet.

J.-L. G

REES (A. R.), COCKSHULL (K. E.), HAND (D. W.), HURD (R. G.), éd. — CROP PROCESSES IN CONTROLLED ENVIRONMENTS. — Proceedings of an international symposium held at the Glasshouse Crops Research Institute, Littlehampton, Sussex, England, July 1971. Academic press, London and New York, 1972, 391 p. (Applied botany — a series of monographs, SUTCLIFFE (J. F.) consulting éd.).

Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux divers facteurs du milieu, dont les actions conjuguées influencent les mécanismes de fonctionnement des plantes. Mieux connaître les interactions de ces facteurs permet de nombreuses applications pour la production végétale. Le but de ce symposium était d'explorer les progrès récents réalisés dans ce domaine afin de préciser les problèmes les plus urgents pour lesquels il conviendrait d'entreprendre de nouvelles recherches.

La plupart des articles publiés dans cet ouvrage sont le résultat de recherches personnelles, quelques-uns sont essentiellement des mises au point, d'autres proposent des modèles théoriques comme moyen d'approche des problèmes. Ils englobent les sujets suivants :

1. Progrès récents en technologie des serres (maîtrise de la lumière, de la température et du gaz carbonique, lumière d'appoint, chambres de croissance, serres en plastiques).

2. Méthodes micrométéorologiques et physiques (en plein champ et en culture sous abri).

3. Nouveaux aspects des études en chambre de croissance et atmosphère contrôlée (mesures précises des échanges gazeux, températures des racines et des organes aériens, sources lumineuses naturelles et artificielles).

4. Physiologie végétale (photorespiration, biochimie de la photosynthèse, translocation et accumulation des substances assimilées, contrôle hormonal de la croissance et du développement).

5. Généralisation des méthodes d'analyse quantitative et de simulation par ordinateurs à ces divers processus.

L'ouvrage donne la liste des participants, et comprend un index des auteurs cités, ainsi qu'un index par sujets et noms de plantes.

J.-L. G.

CHOUARD (P.), BILDERING (N.) de, éd. — PHYTOTRONIQUE ET PROSPECTIVE HORTICOLE. — PHYTOTRONIQUE II. — Compte rendu du Symposium tenu à Tel Aviv le 25 mars 1970 à l'occasion du XVIII Congrès international de l'Horticulture. Gauthier-Villars, C. N. R. S., Paris, 1972, 391 p.

Après la publication en 1969 d'un premier volume consacré à la phytotronique, à la suite d'une table ronde tenue à Londres en 1964, cet ouvrage rassemble les communications d'un autre symposium organisé par l'équipe du phytotron de Gif-sur-Yvette. Cette réunion avait surtout pour but de promouvoir une rencontre entre biologistes, ingénieurs, techniciens, installateurs, utilisateurs et réalisateurs « d'environnement contrôlé ».

Les exposés ont été réunis entre quatre chapitres :

I. — Problèmes généraux de phytotronique (7 communications : historique, phytotron et environnement, problèmes techniques de la simulation des conditions de l'environnement, mesure de la température de feuille, exemple de laboratoire et « phytosystèmes » commercialisés).

II. — Apports réels et possibles au progrès horticole (8 communications : échanges gazeux des plantes, déterminisme floral, action de la lumière, de la température, croissance de plantes en « tubes à échantillons », culture de méristèmes, utilisation de phytotron pour la sélection).

III. — Éléments de prospective horticole (8 communications : climatiseurs, serres gonflables, thermothérapie, phytotron « solaire », prospective de construction de serre).

IV. — Discussions, vœux et conclusions (mouvement de l'air dans les phytotrons et enceintes climatisées, sources lumineuses utilisables pour l'éclairage des plantes).

J. L. G.

HOUSTON (D. F.), éd. — RICE CHEMISTRY AND TECHNOLOGY. — St-Paul, Minnesota American association of cereal chemists, Monograph series, vol. IV, 1972, 517 p.

Cet ouvrage rassemble une série de mises au point sur la chimie et la technologie du riz et contient une bibliographie fournie permettant de remonter aux travaux originaux.

Les vingt chapitres qui composent cet ouvrage, écrits par des auteurs différents, se répartissent ainsi : Après une introduction comparant le riz aux autres céréales (production et utilisation), deux chapitres traitant de la composition chimique (caryopse du grain de riz, enzymes du riz), un chapitre des critères de qualité, puis viennent le séchage et le stockage (y compris les problèmes phytosanitaires en cours de conservation).

L'usinage du riz fait l'objet des chapitres suivants, (mouture, extraction, vieillissement, paddy, riz décortiqué, riz glacé, enrichissement du riz, riz étuvé). La composition, la morphologie, les propriétés et les utilisations agricoles et industrielles des farines, du son, et des balles sont étudiés séparément.

Enfin les derniers chapitres sont consacrés à l'utilisation du riz et de ses sous-produits (riz pré-cuit, alimentation humaine, aliments en conserve, préparations alcooliques, saké).

J. L. G.

VUKOV (K.). — PHYSIK UND CHEMIE DER ZUCKERRÜBE ALS GRUNDLAGE DER VERARBEITUNGSVERFAHREN. — Physique et chimie de la betterave à sucre comme base des procédés de transformation. Akademiai Kiado, Budapest, 1972, 458 p.

Dans cet ouvrage, l'auteur a rassemblé les résultats de plus de 20 années de recherches sur la qualité technique de la betterave à sucre, en s'appuyant sur leurs propriétés physiques et chimiques les plus importantes.

Il examine les conséquences de l'action de nombreux facteurs (facteurs génétiques, lieux de culture, climat et conditions atmosphériques, degré de développement, état phytosanitaire) et de quelques techniques culturales sur les propriétés des betteraves les plus importantes pour la technologie, dans toutes les grandes régions de culture betteravière du monde. Le défrichement et l'entreposage sont en outre étudiés pour pouvoir fonder scientifiquement, en rapport avec ces données, une technique de transformation la meilleure possible.

Cette monographie constitue donc un riche ouvrage de référence pour les sélectionneurs, les betteraviers, chimistes et ingénieurs. Il comprend, en annexe, une description de quelques méthodes d'analyses (technologie essentiellement), 33 pages de bibliographie, une liste des symboles des unités de mesure employées et un index par sujet.

J. L. G.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions ;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. HÉNIN, Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

AGRONOMIE.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-1973

Dépôt légal : 2e trimestre 1973. N° d'impression : 638.

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24. N° 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (4), 401-424.

ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA GRANULATION DES SOLS SOUS PRAIRIES DE GRAMINÉES

I. — Paramètres définissant la structure granulaire et leur relation avec la porosité du sol

BUI HUU TRI et G. MONNIER
avec la collaboration technique de Claude Cloarec et C. Jeandet

Laboratoire des Sols, Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

A l'examen morphologique d'un nombre important d'échantillons de sols variés prélevés sous prairies jeunes, on a observé des états structuraux très différents qui ont pu être caractérisés par deux paramètres, obtenus à partir d'un test utilisant l'alcool éthylique à 95° comme liquide de traitement et de tamisage.

Le premier paramètre, T_{10}, est le taux cumulé d'éléments structuraux de diamètre inférieur à 10 mm ; il représente le degré de développement de la structure. Le deuxième, φ, est la taille moyenne de ces éléments ; il indique le degré de finesse de la granulation.

On constate que les terres présentant un état de division nette se subdivisent en deux groupes, granulaires normales et granulaires légères, impliquant des mécanismes de granulation différents dont les conséquences sont différentes également.

Les calculs de corrélation font apparaître un seuil, $T_{10} = 30$ p. 100, dans le degré de développement, à partir duquel outre sa visibilité, la granulation intervient pour augmenter la porosité totale du sol. Celle-ci, dans les terres granulaires normales, est significativement reliée à T_{10-30}, et mieux encore, à $1/\varphi$, ces deux paramètres étant d'ailleurs très dépendants l'un de l'autre. En outre, dans ces terres, les variations de la porosité totale sont dues aux variations de la porosité structurale définie comme la fraction de porosité correspondant au volume propre des fissures entre les éléments structuraux.

INTRODUCTION

Au cours d'un travail récent, l'un de nous (Tri, 1968) a étudié les conditions d'apparition de l'état structural granulaire fréquemment observé sous prairie de graminées. Cette recherche conduite par la voie expérimentale en vase de végétation ou sur des modèles de laboratoire plus simples encore, a permis de mettre en évidence le rôle joué par un certain nombre de facteurs dans l'apparition et le développement de la granulation. C'est ainsi qu'il est apparu que si la présence

des racines était une condition nécessaire, elle ne pouvait être considérée comme suffisante. L'étude des mécanismes mis en cause a en effet montré que c'est par l'intermédiaire des phénomènes de gonflement et de retrait liés à des alternances d'humectation et de dessiccation que se produisaient la fissuration et (ou) l'agrégation responsables, selon le cas, de la granulation. Dans ces conditions, il était prévisible, et l'expérience l'a confirmé, que la texture du sol et le régime hydrique auquel il était soumis intervenaient de façon déterminante. C'est seulement lorsque ces deux types de conditions sont remplis que l'influence des racines se manifeste en accentuant le phénomène et, plus particulièrement, en commandant la dimension des éléments structuraux résultants.

Toutefois, la méthode même utilisée, qui reposait sur une schématisation de la réalité dans le but d'en isoler les mécanismes principaux, entraînait certaines limitations à la généralisation des résultats obtenus :

— en premier lieu, il n'avait pu être mis en évidence que l'action des seuls facteurs volontairement mis en jeu ;

— par ailleurs, certains de ces facteurs, et en particulier la constitution physique du matériau soumis à l'évolution n'était étudiée que de façon très discontinue sur quelques matériaux considérés comme caractéristiques. De ce fait, les résultats obtenus ne pouvaient conduire à une formulation quantitative de leur influence, ni à la détermination de seuils d'apparition de la granulation.

Nous nous proposons donc ici de compléter cette première approche par l'étude de l'état structural réellement observé sous prairie dans des conditions pédologiques, climatiques et culturales très variées. Nous nous efforcerons de chercher les relations entre d'une part, l'apparition, le développement et la finesse de la granulation et, d'autre part, un nombre plus élevé de facteurs caractéristiques du milieu. Bien entendu, la constitution de l'échantillon de cette enquête et le choix des méthodes mises en œuvre pour caractériser les différentes situations ont été orientés et facilités par les résultats dont nous venons de rappeler les grandes lignes. Leur description fera l'objet de la première partie de ce mémoire. Dans une deuxième partie, nous rechercherons les paramètres définissant l'état structural granulaire et enfin, nous examinerons les conséquences de la granulation au niveau de la porosité de la couche de sol intéressée.

Dans un mémoire ultérieur, ces paramètres de granulation seront étudiés en relation avec la constitution physique du sol et le système racinaire des graminées fourragères dans le but de déterminer les conditions d'apparition et de développement de la granulation et les facteurs qui commandent la taille des éléments structuraux obtenus.

I. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Constitution de l'échantillon*

1. *Considérations générales.*

La collecte des échantillons a été réalisée à partir de la plupart des régions agricoles de France dans des conditions variées de sol, d'espèces de graminées, d'exploitation et de climat. Des 80 échantillons reçus, nous avons éliminé ceux qui ont été sous luzerne et retenu 71.

Ces derniers proviennent de sols à textures sableuses, limoneuses ou moyennement argileuses. Il n'y a pas eu de terres ayant plus de 60 p. 100 d'argile.

L'espèce de graminées la plus représentée est le Ray-Grass d'Italie ; viennent ensuite la fétuque des prés, la fétuque élevée, le dactyle et la fléole. Dans certains cas, nous avons également eu affaire à des mélanges de ces espèces. Les prairies ont été conduites soit en culture sèche, soit en culture irriguée et exploitées soit par pâturage, soit par fauche. Toutefois, le nombre de prairies irriguées étant trop petit par rapport à celui des prairies non irriguées, l'étude de la granulation que nous avions prévue en fonction de l'approvisionnement en eau n'a pas pu être réalisée.

Enfin, comme l'objet de ce travail était limité à l'étude de la granulation, nous avons cherché à réduire, dans toute la mesure du possible, les phénomènes complémentaires susceptibles d'intervenir sous prairie, en particulier la stabilisation par les matières organiques (MONNIER, 1965) et l'action de la faune du sol. Pour cela, nous avons choisi des prairies relativement jeunes, ayant tout au plus 20 mois au moment du prélèvement. En fait, elles contiennent le plus souvent des taux de matières organiques déjà importants pouvant atteindre dans un cas extrême 14 p. 100. Nous verrons dans un mémoire ultérieur en quoi cela peut influencer les résultats obtenus. D'ores et déjà, il est à noter que les résultats rapportés dans ce mémoire représentent la conséquence globale de l'action intégrée de tous les facteurs que nous venons d'énumérer.

2. *Mode de prélèvement.*

Cette opération a été standardisée suivant un protocole dont nous indiquons ici les grandes lignes.

Sur chaque prairie retenue, un monolithe de terre d'environ 18 × 13 × 13 cm de dimensions est prélevé de façon à éviter toute perturbation de son état structural. Il est ensuite enveloppé dans une toile de nylon et séché à l'air avant d'être expédié. Notons que, pour notre enquête, c'est l'état structural de ce monolithe particulier par rapport à celui des monolithes provenant d'autres prairies qui nous intéressait, plus que la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la prairie considérée. C'est la raison pour laquelle un seul monolithe a été pris sur chaque prairie.

Sur les monolithes ainsi obtenus, nous avons effectué des observations, des mesures et des tests sur 2 profondeurs (0-6 cm et 6-12 cm) dont la justification est donnée par ailleurs.

B. — *Description du système sol-racine*

Pour définir ce système, nous avons mis en œuvre un certain nombre de méthodes que nous allons rapidement décrire.

1. *Caractérisation du matériau.*

Elle est effectuée sur des échantillons issus de monolithes et préalablement tamisés à 2 mm et comporte essentiellement trois catégories de mesures.

a) *Évaluation quantitative des éléments constitutifs.*

Ceux qui nous intéressent en particulier sont la granulométrie, les taux de matières organiques. Ils ont été déterminés respectivement par une analyse granulométrique sans décarbonatation, un dosage du carbone total par la méthode Anne.

b) *Évaluation des propriétés du matériau.*

Les mesures de pH et la détermination de la capacité d'échange (par extraction à l'acétate d'ammonium N neutre) ont pour but de mieux caractériser l'argile et la composition ionique du sol. L'humidité équivalente a été déterminée par centrifugation à 1 000 g dans le but de compléter la qualification texturale des sols étudiés. De plus, c'est à partir de cette humidité caractéristique qu'est déterminée l'humidité de malaxage adoptée pour la préparation des échantillons en vue de définir leur porosité texturale et leur coefficient de gonflement potentiel (FIÈS et FAURE, 1972).

La porosité texturale est une caractéristique liée à la composition granulométrique du matériau. Elle représente le volume des vides ménagés par l'arrangement des particules élémentaires à l'état humide ou à l'état sec et peut être obtenue à partir de la relation :

$$P_{text.} = \frac{\gamma - d_t}{\gamma} \times 100 \qquad (1)$$

dans laquelle γ est la densité réelle du matériau et d_t est la densité apparente texturale due à l'organisation spontanée des éléments constitutifs de ce dernier. La densité réelle γ a été déterminée au pycnomètre à air et la densité apparente texturale d_t sèche et humide par la méthode au vernis. Pour cette dernière, le protocole suivi pour la préparation des mottes est celui adopté par KHEYRABI et MONNIER (1968) et le vernis utilisé (F 310) est apparenté à celui (F 220) préconisé par BRASHER (1966).

Quant au coefficient de gonflement potentiel, il est déterminé à l'humidité de saturation, c'est-à-dire dans l'état où tous les pores sont remplis d'eau. Il définit un gonflement potentiel lié à la texture et à la nature de l'argile que nous désignons par G. Cet indice a été calculé suivant la relation :

$$G = \frac{V_h - V_s}{V_s} \times 100 \qquad (2)$$

dans laquelle V_h et V_s sont respectivement les volumes apparents humide (à saturation) et sec mesurés par la méthode au vernis, à partir d'un échantillon qui a été préparé suivant le protocole KHEYRABI et MONNIER (1968).

Notons que la valeur absolue de ce coefficient exprime également la possibilité qu'a un échantillon saturé de diminuer de volume au cours de sa dessiccation. Il mesure donc l'amplitude maxima des variations de volume quel qu'en soit le signe susceptible de se manifester lorsque l'humidité du sol varie dans un sens ou dans l'autre.

c) *Évaluation de la stabilité structurale.*

Enfin, pour nous rendre compte du comportement des échantillons au point de vue stabilité structurale, le test classique de HÉNIN et MONNIER (1956) a été également pratiqué sur des prises d'essai provenant des monolithes.

2. *Caractérisation du système racinaire.*

Elle est essentiellement basée sur la détermination de la longueur des racines par la méthode des intersections de NEWMAN (1965).

a) *Principe.*

Soit une surface S sur laquelle on a disposé au hasard un certain nombre de segments de droite. Selon NEWMAN, le nombre d'intersections N avec les segments d'une racine étalés sur cette surface est d'autant plus grand que la racine est plus longue. N peut donc être utilisé pour estimer la longueur de la racine. Soit Δl un élément de racine ; NEWMAN a démontré que le nombre d'intersections de Δl avec les segments de droite ayant une longueur totale H serait :

$$N = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{(\Delta l)H}{S} |\sin \theta| \, d\theta \qquad (3)$$

θ étant l'angle qui se forme au point d'intersection ; et après intégration :

$$N = \frac{2(\Delta l)H}{S} \qquad (4)$$

Une aliquote de racines de longueur l peut être considérée comme composée de la somme de courts segments de droite Δl. La longueur l peut de ce fait être estimée en fonction de N :

$$l = \frac{\pi NS}{2H} \qquad (5)$$

b) *Description de la technique.*

A partir d'un poids P_r de racines extraites d'un échantillon de terre pesant entre 800 et 1 000 g (P_e) dont nous avons déterminé au préalable la densité apparente d_a, nous avons prélevé une aliquote p (50 à 100 mg). Cette dernière est étalée uniformément dans un rectangle de dimensions S = 8 × 6 cm, dessiné sur le fond d'une boîte de Pétri. Ce rectangle est subdivisé en 20 petits rectangles de 1,6 cm × 1,5 cm de côté chacun et numérotés de 1 à 20 pour identification sous le binoculaire. Les racines étant bien aplaties et réparties dans le grand rectangle, on les observe au binoculaire (grossissement × 6) et l'on compte le nombre d'intersections entre les fragments de racines contenus dans chacun des petits rectangles et le réticule

de l'oculaire. Nous avons effectué 2 comptages. Soit D (cm), la longueur apparente du réticule et N le nombre total d'intersections correspondant à C comptages ; la longueur l (cm) de l'aliquote est alors calculée à partir de la formule (5) dans laquelle $H = C \times D$.

c) *Notions de longueurs spécifique et volumique.*

En partant de la correspondance ainsi obtenue entre le poids et la longueur de l'aliquote, nous avons déterminé deux caractéristiques que nous appellerons longueur spécifique (L_s) et longueur volumique (L_s).

La longueur spécifique L_s est la longueur par unité de poids de racines (cm/g) considérée comme un caractère spécifique du système racinaire.

La longueur volumique L_v est une évaluation de la densité d'enracinement dans le sol en place. Elle est exprimée en cm/cm³ et calculée par la formule :

$$L_v = \frac{L_s \times P_r \times d_a}{P_e} \qquad (6)$$

dans laquelle :

P_r = poids de racines ;
P_e = poids de l'échantillon de terre ;
d_a = densité apparente de l'échantillon.

Rappelons que cette longueur volumique semble caractériser de façon efficace l'enracinement par rapport au phénomène de granulation (Tri, 1968).

C. — *Évaluation de l'état structural et de ses conséquences*

1. *Critères de définition.*

a) *Observations visuelles.*

Avant toute opération de prélèvement d'échantillons pour les mesures décrites précédemment, les monolithes ont été soumis, dans l'état (sec) où nous les avons reçus, à une observation directe. Celle-ci, effectuée sur chacune des 2 profondeurs retenues, nous a permis de distinguer 3 états structuraux principaux que nous avons qualifiés de *continu*, *tendance granulaire* et *granulaire*. Il n'a pas été possible de parvenir à un classement plus précis ni d'évaluer de façon suffisamment sûre la taille moyenne des éléments structuraux.

b) *Le test à l'alcool.*

Nous avons ensuite comparé cette classification qualitative avec les résultats obtenus par le test à l'alcool sur des échantillons provenant des 2 profondeurs de chacun des monolithes (Monnier et Tri, 1971).

α. *Mode opératoire.* — Rappelons que le test à l'alcool consiste à immerger dans l'alcool éthylique à 95° un échantillon non remanié (60 à 100 g) de la couche de sol à étudier et de le tamiser, également dans de l'alcool, à travers une batterie de tamis ; nous en avons utilisé 6 ayant des ouvertures de mailles de 10, 5, 3, 2, 1 et 0,5 mm. Les éléments structuraux recueillis sur chacun de ces tamis sont ensuite séchés à 105°C et pesés. Leur taux respectif par rapport au poids initial de l'échantillon détermine la distribution dimensionnelle des éléments structuraux. Nous avons retenu deux critères pour la caractériser : le taux d'éléments structuraux plus petits que 10 mm et leur taille moyenne.

β. *Le taux d'éléments < 10 mm.* — Étant donné qu'en général, la taille des éléments structuraux des sols granulaires est relativement petite, ne dépassant pas 10 mm (Retzer et Russel, 1941 ; Bekarewitsch, 1964) le taux des éléments < 10 mm peut constituer un indice de présence ou d'absence de granulation. Ce taux peut en outre servir pour évaluer le degré de développement du phénomène. Pour simplifier l'écriture, nous le désignons désormais par T_{10}.

γ. *La taille moyenne.* — Pour déterminer cette caractéristique d'une manière convenable, il faut d'abord tester la normalité de la distribution. Nous avons utilisé pour cela la méthode graphique d'Henry (C. E. T. A. M. A., 1969). On porte les taux cumulés d'éléments inférieurs à une taille donnée soit sur un graphique gausso-arithmétique, soit sur un graphique gausso-logarithmique. Si les points représentant la distribution s'alignent sur une droite sur le premier graphique, elle est dite normale. S'ils ne sont pas alignés sur ce graphique, mais qu'ils le sont sur le deuxième, la distribution est alors dite log-normale. Quand une distribution est

normale ou log-normale, elle est complètement définie par une valeur moyenne et son écart type qui peuvent être déterminés directement sur le graphique. Dans le cas particulier qui nous intéresse, cette valeur définit la taille moyenne φ d'une distribution d'éléments structuraux.

2. *Paramètres définissant les conséquences de l'état structural : la porosité totale et la porosité mottière.*

Une caractéristique susceptible d'être influencée par l'action des racines sur le sol est sa porosité. Faute d'avoir pu, pour des raisons évidentes, effectuer des mesures de porosité totale caractérisant globalement l'état structural d'une couche de sol en place (méthode des anneaux ou densitomètre à membrane) à une humidité donnée, nous nous sommes bornés à des mesures de porosité effectuées sur des volumes plus petits représentés par des mottes sèches de 15 à 400 g prélevées à partir des monolithes reçus. La porosité « totale » a été déterminée à partir de la formule :

$$P_{tot.} = \frac{\gamma - d_a}{\gamma} \times 100 \qquad (7)$$

dans laquelle γ est la densité réelle du sol déterminée au pycnomètre à air et d_a la densité apparente déterminée par la méthode au vernis. Nous discuterons lors de la présentation des résultats la pertinence de cette porosité totale ainsi obtenue.

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. — *Caractérisation des structures continues et granulaires*

1. *Choix des profondeurs à étudier.*

Les figures 1 et 2 montrent que pour les espèces de graminées fourragères rencontrées dans cette enquête, la distribution des longueurs spécifiques des racines en surface et en profondeur est très différente, quoique normale, dans la plupart des cas. L'observation directe des monolithes a également montré qu'en général le degré d'extériorisation d'un état structural et surtout l'intensité d'enracinement ne sont pas les mêmes dans les 2 couches qui correspondent approximativement à des profondeurs de 0-6 et 6-12 cm. Compte tenu des remarques précédentes et des résultats d'un travail antérieur (TRI, 1968) qui ont indiqué une influence majeure des racines sur la granulation, nous avons choisi d'étudier séparément ces 2 profondeurs.

2. *Les seuils définissant une structure continue ou granulaire.*

Les notations visuelles ont été comparées aux données quantitatives correspondantes, à savoir les taux cumulés d'éléments structuraux < 10 mm obtenus par le test à l'alcool. Cette comparaison montre (tabl. 1) que 91 p. 100 (0-6 cm) et 75 p. 100 (6-12 cm) des échantillons caractérisés par $T_{10} < 10$ p. 100 ont été notés visuellement continus, tandis que 78 p. 100 (0-6 cm) et 77 p. 100 (6-12 cm) des échantillons pour lesquels T_{10} est supérieur à 30 p. 100 ont été notés « granulaires ».

D'autre part, il existe pour $10 < T_{10} < 30$ p. 100, une zone d'incertitude que nous appelons zone à structure incertaine et qui comprend aussi bien des structures continues et à tendance continue que des structures granulaires ou à tendance granulaire. A partir de ces observations, on peut considérer en première approximation que lorsque le test à l'alcool fournit un taux T_{10} inférieur à 10 p. 100, le sol étudié peut être qualifié de continu, et qu'il est granulaire lorsque ce taux est supérieur à 30 p. 100. En revanche, si l'on obtient un taux compris entre 10 et 30 p. 100, le diagnostic doit être réservé.

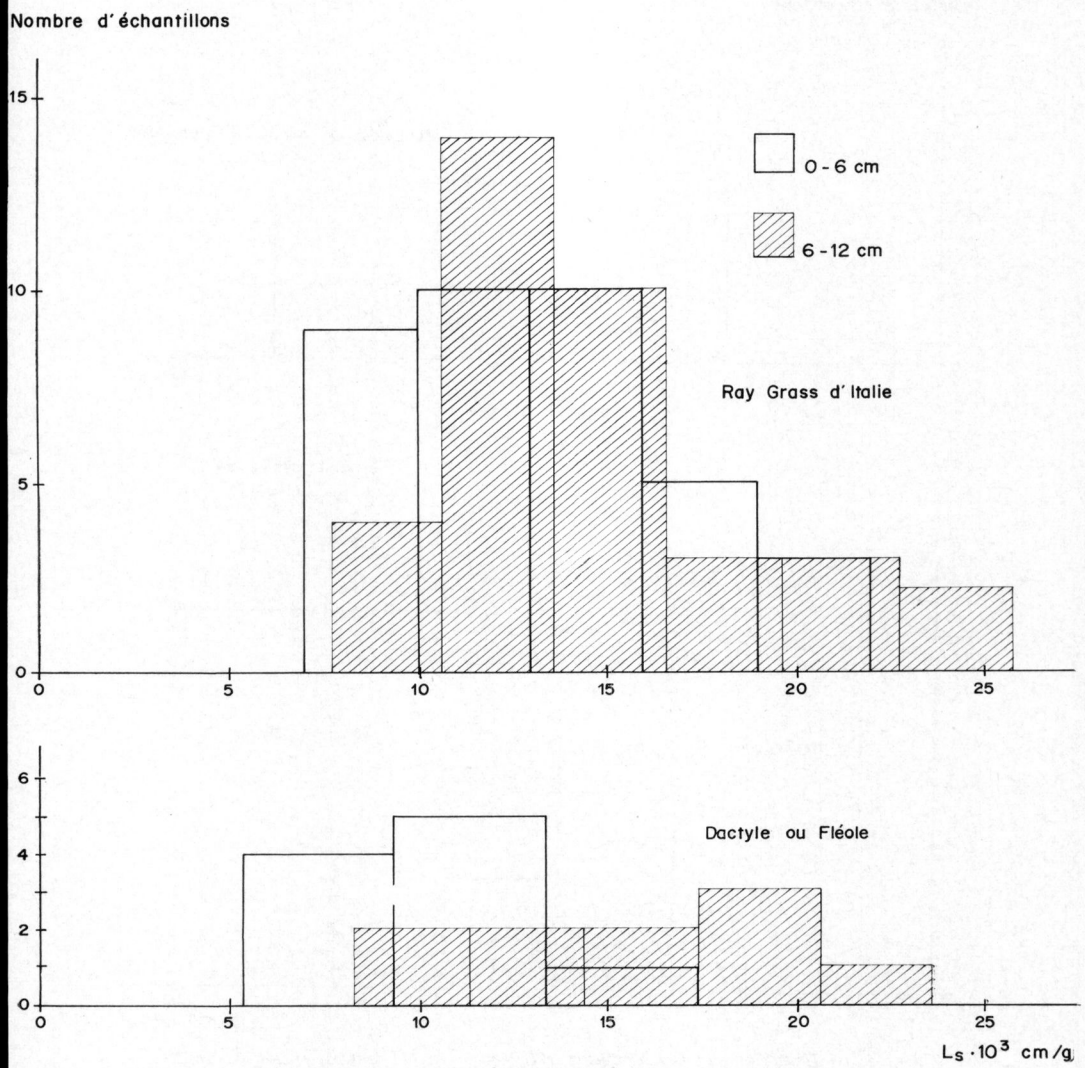


FIG. 1. — *Histogrammes des longueurs spécifiques, L_s, de divers systèmes racinaires*

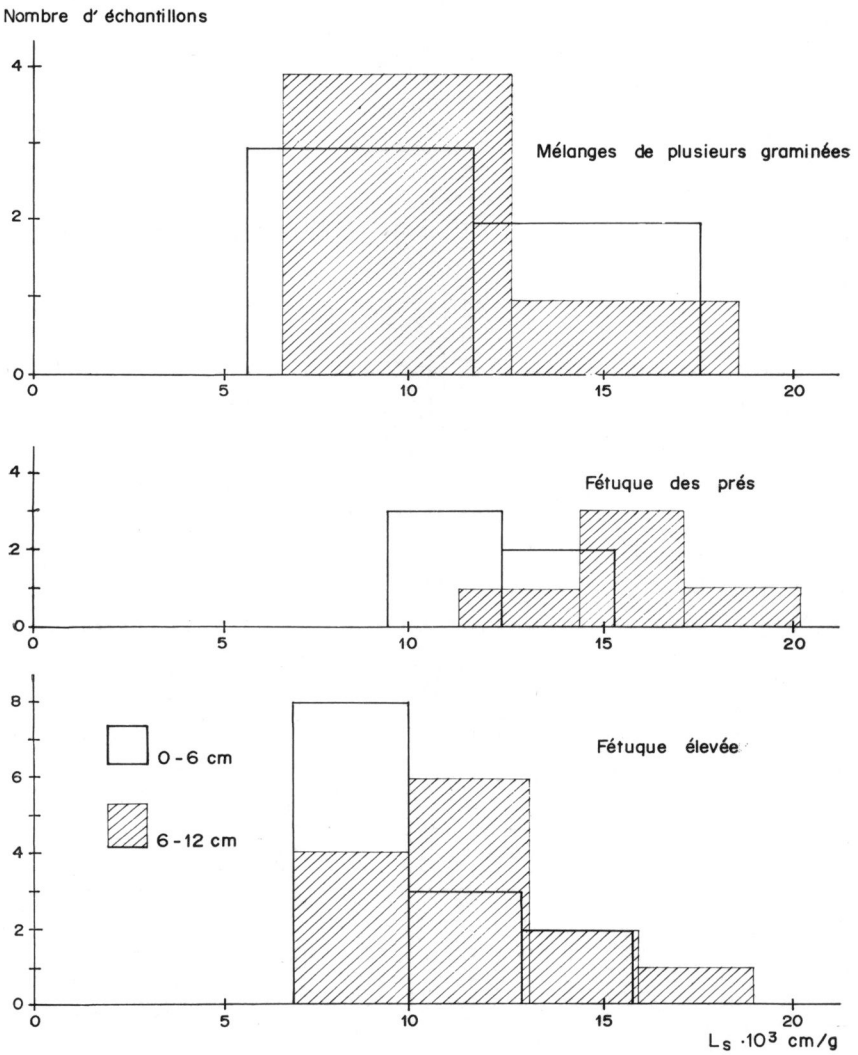


FIG. 2. — *Histogrammes des longueurs spécifiques, L_s, de divers systèmes racinaires*

Par ailleurs, on note que l'élévation du seuil T_{10}, caractéristique de l'apparition de la granulation, n'améliore pas sensiblement son pouvoir discriminant.

TABLEAU I

Comparaison entre les notations visuelles et les résultats du test à l'alcool

Taux cumulé d'éléments < 10 mm	⩽ 10 %		10 à 30 %		⩾ 30 %		⩾ 40 %		⩾ 50 %	
Profondeur de l'échantillon (cm)	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12
Nombre d'échantillons par classe	21	24	21	25	37	30	27	23	20	19
Notation visuelle la plus fréquente dans la classe	Structure continue		Structure continue		Structure granulaire		Structure granulaire		Structure granulaire	
% correspondant dans la classe	91	75	57 (1)	64 (2)	78	77	78	87	80	89

(1) Les 43 p. 100 d'échantillons non continus ont été notés { pour 19 % : granulaire ; pour 24 % : tendance granulaire

(2) Les 36 p. 100 d'échantillons non continus ont été notés { pour 20 % : granulaire ; pour 16 % : tendance granulaire

3. *Influence globale de la texture.*

Il faut rappeler d'abord que dans un certain nombre de cas, des différences de jugement entre l'état structural des 2 couches étudiées sont intervenues lors de l'observation visuelle. Autrement dit, l'une des couches a pu être notée granulaire par exemple, tandis que l'autre se présentait comme continue. L'analyse granulométrique étant faite sur l'ensemble des 2 couches, il était donc nécessaire de juger si l'état structural global de l'échantillon devait être classé granulaire ou continu pour pouvoir établir la correspondance générale avec la texture.

A cet effet et en fonction des observations rapportées dans la rubrique précédente, nous avons effectué la répartition des différentes catégories de structures observées selon la règle suivante :

Catégorie de structure	Conditions nécessaires et suffisantes de classement	
Continue	$T_{10} < 10$ %	Dans les 2 couches considérées
Incertaine :		
— tendance continue ...	$10 \leqslant T_{10} \leqslant 15$ %	1 des 2 couches
— tendance granulaire ..	$15 < T_{10} \leqslant 30$ %	1 des 2 couches
Granulaire	$T_{10} > 30$ %	1 des 2 couches

Nous verrons dans un mémoire ultérieur que la valeur $T_{10} = 15$ p. 100 représentant le seuil de distinction entre les structures incertaines à tendance granulaire et à tendance continue a été suggérée par les termes constants des équations de régression obtenues pour l'ensemble des échantillons entre T_{10} et certains facteurs de granulation.

En portant sur un triangle de texture (fig. 3), les structures ainsi classées en fonction de la composition granulométrique des sols réduite à 3 fractions (argile, limon total 2-50 μ, sable), on constate tout d'abord que la distribution des points ne semble pas indiquer une influence déterminante de la texture. Toutefois, trois indications peuvent être tirées de cette représentation :

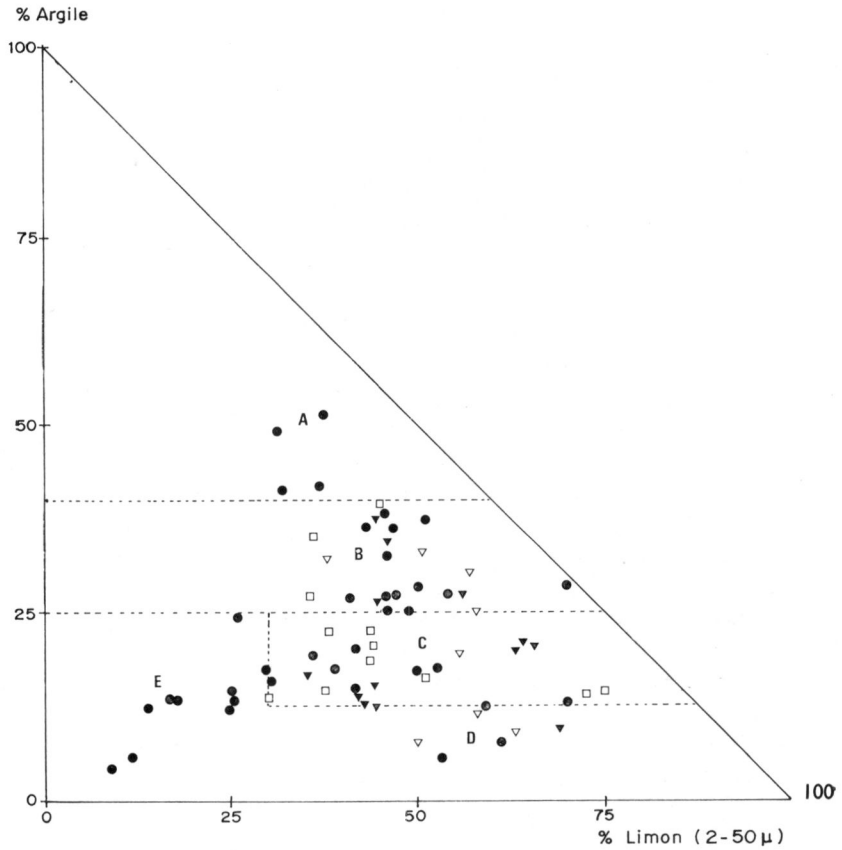


FIG. 3. — *Classement des structures révélées par le test à l'alcool en fonction de la texture*

□ structure continue (T 10 < 10 %)
▽ structure incertaine à tendance continue (10 % ⩽ T 10 ⩽ 15 %)
▼ structure incertaine à tendance granulaire (15 % < T 10 ⩽ 30 %)
● structure granulaire (T 10 > 30 %)

— l'absence de structures continues dans la zone des terres sableuses (moins de 15 p. 100 d'argile et de 30 p. 100 de limon total) où se manifestent au contraire des structures granulaires. De plus, on peut noter également la présence d'une majorité de structures granulaires ou à tendance granulaire dans une zone définie approxima-

tivement par une teneur de moins de 13 p. 100 d'argile et de 50 à 75 p. 100 de limon. Les structures granulaires se trouvant dans cette zone et la zone des terres sableuses seront désormais qualifiées de « granulaires légères » (zones D et E) ;

— une certaine tendance à la localisation des structures granulaires autres que les structures granulaires légères dans la partie du triangle correspondant à des teneurs en argile supérieures à 25 p. 100 (65 p. 100 des structures classées granulaires sont dans cette zone ; au-dessus de 40 p. 100 d'argile, on en trouve à 100 p. 100). Elles seront désormais qualifiées de structures granulaires normales (zones A et B) ;

— la dissémination des structures incertaines (tendance continue et granulaire) dans la plupart des zones texturales sauf la plus sableuse (zone E) et la plus argileuse (zone A).

Ainsi, malgré une bonne répartition des points sur le triangle attestant un échantillonnage satisfaisant au niveau de la texture, et hormis quelques tendances, la connaissance de la texture ne paraît pas suffisante pour permettre une prévision sûre de l'état de granulation des terres sous prairie.

4. *Nature des distributions caractéristiques des 3 types de structure.*

Si l'on porte sur des graphiques gausso-arithmétique d'une part, gausso-logarithmique d'autre part, les taux cumulés moyens d'éléments inférieurs à une taille donnée soit : 10, 5, 3, 2, 1 et 0,5 mm obtenus à l'issue du test à l'alcool, on constate

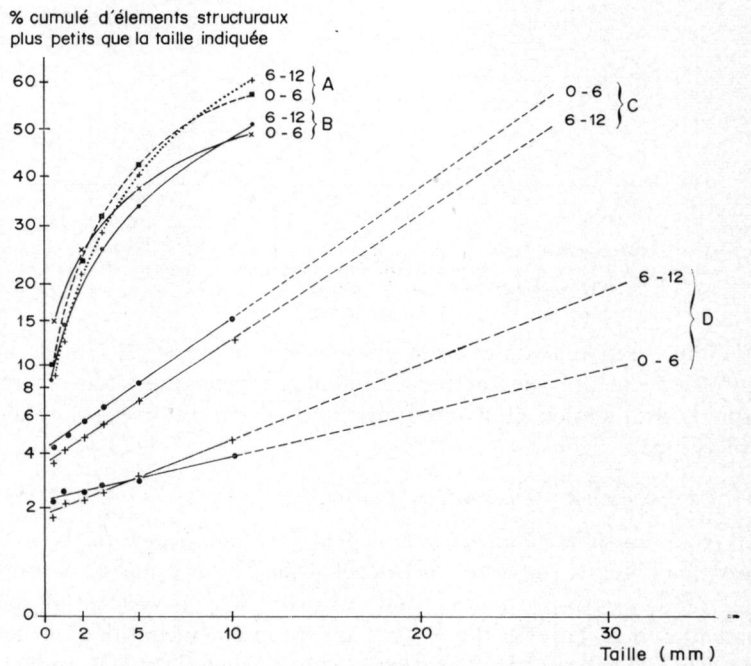


FIG. 4. — *Représentation gausso-arithmétique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues* (D), *incertaines* (C), *granulaires légères* (B) *et normales* (A), *dans les couches 0-6 et 6-12 cm*

(fig. 4 et 5) que les distributions correspondantes aux structures continues ou appartenant au groupe « incertain » sont normales, tandis que les structures granulaires légères et normales présentent des distributions pratiquement log-normales.

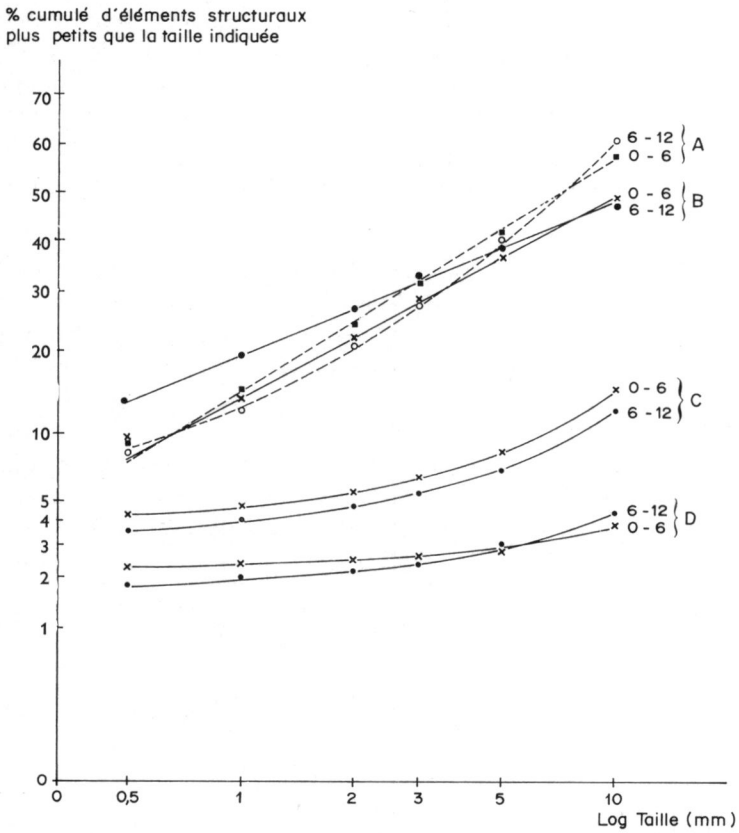


FIG. 5. — *Représentation gausso-logarithmique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues* (D), *incertaines* (C), *granulaires légères* (B) *et normales* (A) *dans les couches 0-6 et 6-12 cm*

Dans l'étude expérimentale sur la granulation des prairies, l'un de nous (TRI, 1969) avait déjà constaté que l'action des racines de graminées fourragères conduisait, lorsque la granulation était observée, à une distribution log-normale des éléments structuraux.

5. *Critères définissant une structure granulaire.*

Nous avons vu qu'un état structural peut être défini par un taux d'éléments structuraux fins obtenus par le test à l'alcool. Dans le cas d'une structure continue, ce taux est faible (< 10 p. 100) ; ceci est en accord avec la conception même de ce type de structure dans laquelle il n'existe pas à proprement parler d'éléments structuraux. Il n'y a donc pas de distribution dimensionnelle à déterminer, le seuil $\leqslant$ 10 p. 100 est suffisant pour caractériser cette structure. En revanche, dans le cas des structures granulaires, T_{10} peut varier de 30 à 100 p. 100 et la taille des éléments

structuraux d'une fraction de 1 mm à 10 mm. Il est par conséquent nécessaire d'avoir 2 critères pour définir convenablement ce type de structure. On peut concevoir que T_{10} représente le degré d'extériorisation du phénomène et que la taille moyenne φ traduit le degré de finesse des éléments structuraux. Le premier critère conduit à décrire la structure comme étant faiblement, moyennement ou fortement granulée par exemple. Le second précisera si les éléments de la structure ainsi décrite sont fins ou grossiers. Nous verrons par ailleurs qu'effectivement, le degré de granulation et la taille sont commandés par des facteurs différents.

B. — *Étude statistique des facteurs susceptibles de favoriser la granulation*

Nous avons rassemblé dans le tableau 2 les moyennes et écarts-types établis par catégorie de structure (continue, incertaine, granulaire légère, granulaire normale) correspondant à différents facteurs.

L'examen du tableau 2 montre que certaines indications enregistrées au paragraphe précédent se trouvent précisées. Ainsi, la teneur moyenne en argile des terres granulaires normales est supérieure à 25 p. 100, alors que les structures continues et incertaines ont en moyenne 20 à 21 p. 100 d'argile et les granulaires légères 12,6 p. 100. On constate également des différences notables d'autres caractéristiques du sol, d'ailleurs plus ou moins dépendantes l'une de l'autre, dont le rôle sera examiné dans le deuxième mémoire.

Cependant, indiquons tout de suite, et c'est là un point qui mérite d'être souligné, que les densités d'enracinement sont en moyenne très voisines, à une profondeur donnée, quel que soit le type de structure, mais diffèrent fortement (approximativement du simple au double) d'une profondeur à l'autre (cf. également fig. 1 et 2), ce qui justifie le traitement séparé des couches 0-6 et 6-12 cm.

En résumé, les terres granulaires, qu'elles soient normales ou légères, diffèrent des deux autres catégories par toute une série de facteurs de constitution ou de comportements physiques parmi lesquels nous aurons à rechercher les plus importants. D'ores et déjà, il est possible d'affirmer que la densité d'enracinement, du moins si elle reste dans la gamme des valeurs que nous avons observées, ne détermine pas l'*apparition* du phénomène de granulation ; en d'autres termes, le taux cumulé d'éléments < 10 mm issu du test à l'alcool (T_{10}) paraît indépendant de la longueur de racine par unité de volume tout au long de sa gamme de variations.

C. — *Étude des conséquences de la granulation*

Lors d'une étude expérimentale de la granulation en vase de végétation (Tri, 1968), nous avons remarqué que l'une des caractéristiques physiques du sol, à savoir la densité apparente, varie d'une manière très importante quand on passe d'un état structural continu à un état granulaire provenant d'un même sol ou de deux terres différentes. Les valeurs extrêmes observées variaient de 1,80 à 1,50. De tels changements risquent d'avoir des répercussions profondes sur l'ensemble des propriétés du sol en particulier sur sa porosité qui peut ainsi passer de 34 p. 100 à 45,0 p. 100 par exemple (la densité réelle moyenne étant de 2,72). Nous avons en

TABLEAU 2

Éléments descriptifs des états structuraux

	Continus (B et C, fig. 3)				Incertains (B, C, D, fig. 3)				Granulaires légers (D et E, fig. 3)				Granulaires normaux (A, B, C, fig. 3)			
	0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm			
	Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type		Moyenne		Écart-type	
Argile (%)	21,2		8,6		20,4		9,2		12,6		5,6		28,3		11,2	
Limon (%)	46,0		14,2		52,0		11,8		32,5		19,2		45,4		9,1	
Argile/limon	0,461		0,052		0,392		0,047		0,387		0,065		0,623		0,058	
Matières organiques (%)	2,27		0,73		2,51		1,06		3,18		1,84		3,84		2,70	
Capacité d'échange (méq/100 g)	11,2		3,9		12,0		5,9		8,4		3,8		17,4		5,4	
Gonflement potentiel (%)	11,06		6,70		13,04		8,57		6,08		4,87		21,44		14,75	
	0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm	
	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET	M	ET
Stabilité (S)	2,49	1,73	2,74	1,98	2,10	1,36	2,26	1,48	0,95	0,87	1,02	1,05	2,39	2,90	2,51	2,58
Agrégats stables au benz. Ag_b (%)	5,33	2,84	4,43	3,47	8,82	11,05	7,73	10,21	10,40	9,00	10,40	9,50	12,90	15,30	13,30	15,70
Long. volumique L_v (cm/cm^3)	32,3	19,9	13,0	6,3	37,1	18,0	19,8	19,0	43,5	23,9	20,4	18,5	33,0	21,0	13,1	6,2
Élém. struct. < 10 mm (%)	3,6	2,5	4,2	2,5	14,3	6,4	12,4	5,2	46,0	12,4	48,9	17,5	54,0	21,0	48,0	25,0
Nombre d'échantillons étudiés	12		12		21		21		14		14		24		24	

conséquence recherché si des variations du même ordre de grandeur se retrouvent dans les terres de l'enquête, et s'il est possible de les relier à des paramètres de granulation et de les interpréter.

1. *La densité apparente en relation avec l'état structural.*

Au vu des données rapportées dans le tableau 3, on constate que les variations de la densité apparente et de la porosité totale moyennes sont dans une assez large mesure en accord avec nos observations antérieures. Compte tenu des différences

TABLEAU 3

Variation de la porosité totale en fonction de l'état structural

	Continue		Incertaine		Granulaire normale		Granulaire légère	
	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12	0-6	6-12
Densité apparente	1,73 ± 0,09	1,72 ± 0,12	1,69 ± 0,09	1,70 ± 0,10	1,62 ± 0,19	1,66 ± 0,20	1,56 ± 0,19	1,60 ± 0,18
Densité réelle	2,71 ± 0,04		2,71 ± 0,07		2,75 ± 0,09		2,64 ± 0,06	
Porosité totale (%)	36,1	36,6	37,6	37,2	41,1	39,64	40,91	39,39

assez importantes des densités réelles d'une classe de structure à l'autre — différences à rapprocher des constitutions minérales et organiques moyennes des échantillons correspondants — nous étudions directement les variations de porosité.

2. *Interprétation des variations de porosité.*

a) *Notion de systèmes de porosité.*

On peut considérer que la porosité d'une couche de sol en place est caractérisée par la superposition des deux systèmes :

— une porosité structurale qui représente l'espace poreux correspondant aux fissures délimitant les éléments structuraux et aux cavernes canalicules, etc., d'origine biologique ou parfois liés à des processus pédologiques ;

— une porosité dite mottière qui est propre aux éléments structuraux ou groupements cohérents d'éléments structuraux. Lorsque les mottes proviennent d'une terre à structure continue ou massive ou si elle sont des éléments structuraux simples et non compactés, la porosité qui en résulte dépend essentiellement de la texture. Dans ce cas, la porosité mottière P_m est qualifiée de porosité texturale que nous désignons par P_t et qui est considérée comme caractéristique du matériau.

Ce qui s'exprime pour les volumes de vides par :

$$V_g = V_f + V_m \qquad (8)$$

dans laquelle :

V_g = volume total ou global des vides ;
V_f = volume des fissures entre les éléments structuraux (ou les mottes) ;
V_m = volume des vides à l'intérieur des éléments structuraux (ou des mottes).

Examinons la relation (8) en termes de porosité. Si l'on considère 100 cm³ de sol en place, et si la porosité de fissure ou porosité structurale est égale à P_s p. 100, le volume total des mottes dans 100 cm³ est égal à 100 — P_s.

Si la porosité des mottes est égal à P_m p. 100, le volume des vides situés à l'intérieur des mottes contenues dans 100 cm³ est égal à :

$$\frac{(100 - P_s)P_m}{100}. \tag{9}$$

Le volume total des vides dans 100 cm³ de sol en place, c'est-à-dire la porosité globale P_g p. 100 est donc :

$$P_g = P_s + \frac{(100 - P_s)P_m}{100} = P_m + \frac{(100 - P_m)P_s}{100}. \tag{10}$$

C'est dans cette optique que nous avons procédé à l'analyse des systèmes de porosités en relation avec la granulation. Les mesures dont nous disposons concernent :

— la porosité texturale déterminée expérimentalement par la méthode déjà décrite. Le tableau 4 donne les valeurs moyennes correspondant aux différentes catégories de structures ;

TABLEAU 4

Porosité texturale en relation avec l'état structural

Structure	Porosité
Continue	38,48 ± 4,47
Incertaine	37,90 ± 2,88
Granulaire :	
— légère	38,47 ± 2,4
— normale	39,18 ± 5,5
Moyenne	38,50 ± 0,57

— la porosité totale à l'échelle de mottes d'une dizaine de centimètres cube. Un tel échantillonnage serait manifestement insuffisant pour évaluer des porosités de systèmes dont l'hétérogénéité serait très grande, structures prismatiques ou résultant d'un travail du sol par exemple. Ici nous nous intéressons soit à des structures continues, soit à des structures granulaires dont les éléments sont de petites dimensions par rapport à la taille des mottes sur lesquelles ont porté les mesures (le rapport des volumes est de l'ordre de 10^{-3}).

Dans ces conditions, on peut considérer que la porosité « totale » ainsi obtenue représente un système convenable englobant une porosité de fissure dite structurale, qui pourrait être liée au développement de la granulation, et une porosité mottière assimilable à la porosité texturale obtenue expérimentalement. Il est à noter néanmoins que faute d'avoir pu effectuer des mesures de porosité totale sur le sol en

place d'une part, et de porosité des éléments composants les petites mottes d'autre part, l'analyse des systèmes de porosités rapportée ici ne peut être qu'approximative.

b) *Relation entre la porosité totale et le degré de développement de la granulation : ensemble des échantillons.*

Des calculs de corrélation simple ont permis d'établir les relations suivantes entre la porosité totale y et $T_{10}(x)$:

$$(0\text{-}6 \text{ cm}) \quad y = 22{,}27 + 0{,}35\ x \quad r = 0{,}70\ ^{**} \qquad (11)$$
$$(6\text{-}12 \text{ cm}) \quad y = 33{,}79 + 0{,}14\ x \quad r = 0{,}39\ ^{*} \qquad (12)$$

On peut constater que la relation est beaucoup plus étroite pour la couche 0-6 cm, dont la structuration est en général morphologiquement plus nette. Elle montre également qu'à partir d'une porosité minimum de 22,27 p. 100 (par rapport au minimum théorique de 26 p. 100 obtenu avec un arrangement serré des particules) vient s'ajouter une porosité due à la granulation qui est proportionnelle au degré de développement de cette dernière et qui peut atteindre une valeur de 35 p. 100 quand la granulation est complète ($T_{10} = 100$ p. 100). Pour $x = 30$ p. 100 (seuil de granulation), les valeurs de y, donc les porosités, sont de l'ordre de 33 p. 100 et 38 p. 100 dans les deux couches étudiées. Or, nous avons vu que les porosités totales moyennes des terres granulaires sont plutôt de l'ordre de 39 à 41 p. 100 (tabl. 3), ce qui implique que les porosités n'atteignent ces valeurs que quand x est au-delà de 30. Ceci nous conduit à étudier en particulier les variations de porosité en relation avec $x - 30$ au lieu de x.

c) *La porosité totale des terres granulaires en fonction de leur degré de granulation.*

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de relation significative entre ces deux variables pour les terres granulaires légères. En revanche, elles sont liées significativement en ce qui concerne les terres granulaires normales. Cette relation est traduite par les équations de régression suivantes :

$$0\text{-}6 \text{ cm} \quad y = 37{,}0 + 0{,}19\ (x - 30) \quad r = 0{,}59\ ^{**} \qquad (13)$$
$$6\text{-}12 \text{ cm} \quad y = 37{,}78 + 0{,}15\ (x - 30) \quad r = 0{,}54\ ^{**} \qquad (14)$$

Si l'on compare les termes constants de ces équations de régression avec la valeur moyenne 38,82 p. 100 (tabl. 4) de la porosité texturale des terres granulaires légères (38,47 p. 100) et normales (39,18 p. 100), on constate qu'ils sont du même ordre de grandeur. Dans ces conditions, ces équations peuvent être considérées comme une forme particulière de l'équation générale (équation 10) des systèmes de porosité dans laquelle P_m est représenté par le terme constant (qui est pratiquement égal à la porosité texturale) et le terme en x par la porosité structurale effective qui varie en fonction du degré de développement T_{10-30} de la structure granulaire. Ces résultats sont visualisés, si l'on porte sur un graphique (fig. 6) les porosités correspondant à des structures continues, incertaines et granulaires normales en fonction de T_{10}. Les nuages des points obtenus sont représentés par deux droites de régression dont l'une, issue aux environs de $y = 36$, est quasiment horizontale et représente la porosité totale moyenne probable des structures continues et incertaines, et l'autre dévie de l'horizontale au même niveau de porosité, mais à partir de T_{10} égal 30 p. 100 suivant une pente égale à 0,19 et 0,15 pour les couches 0-6 et 6-12 respectivement.

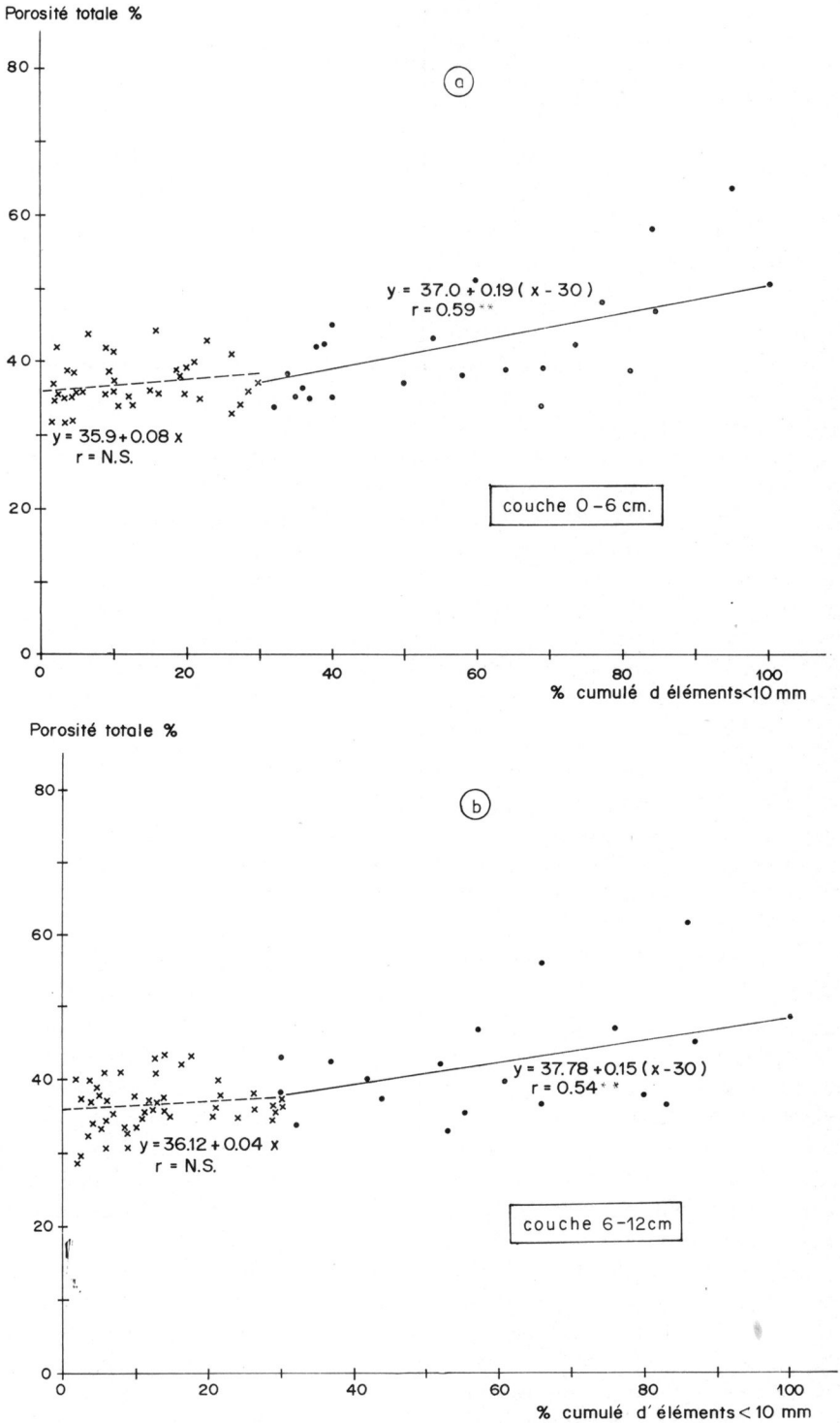


FIG. 6. — *Variation de la porosité totale y en fonction du taux cumulé x d'éléments structuraux < 10 mm* (couches 0-6 et 6-12 cm)

Enfin, on peut constater que pour T_{10} inférieur à 30 p. 100, la porosité est indépendante de x (r non significatif) et se situe au voisinage de 36 p. 100.

Ceci confirme le fait que lorsque le taux d'éléments T_{10} est inférieur à 30 p. 100, nous avons affaire en majorité à des structures continues vraies, c'est-à-dire dépourvues de fissures développées ; dans ces conditions, la porosité reste constante et voisine de la porosité texturale pour l'ensemble de la classe.

d) *Étude de la porosité totale en fonction de la finesse des éléments structuraux : terres granulaires.*

Nous avons vu que la finesse de granulation est caractérisée par la taille moyenne φ d'une distribution d'éléments structuraux. Les calculs de corrélation simple montrent une relation directe très significative entre la porosité totale y et l'inverse de la taille $1/\varphi$ dans le cas des terres granulaires normales, mais il n'existe pas de relation quand il s'agit des terres granulaires légères. Dans le premier cas, on a obtenu les équations de régression suivantes :

$$0\text{-}6 \text{ cm} \quad y = 36{,}35 + 13{,}41\ (1/\varphi) \qquad r = 0{,}77\ ^{**} \tag{15}$$

$$6\text{-}12 \text{ cm} \quad y = 36{,}42 + 13{,}04\ (1/\varphi) \qquad r = 0{,}74\ ^{**} \tag{16}$$

Ces relations suggèrent *a priori* une influence importante de la taille sur la porosité totale. Or, il est évident qu'avec un type d'arrangement donné, la porosité d'un milieu ne dépend pas de la taille des particules qui le composent si celle-ci est uniforme. Elle dépend plutôt du rapport des tailles quand on a affaire à des particules de dimensions variées. Dans ces conditions, on peut supposer que dans les équations ci-dessus, $1/\varphi$ représente plutôt le rapport entre une taille moyenne et une taille de référence, par exemple 1 cm, qui est la limite supérieure retenue pour des éléments structuraux granulaires.

Étant donné d'autre part qu'il existe une relation très étroite entre $1/\varphi$ et $T_{10\text{-}30}$, traduite par les équations :

$$0\text{-}6 \text{ cm} \quad T_{10\text{-}30} = 7{,}94 + 40{,}63\ (1/\varphi) \qquad r = 0{,}76\ ^{**} \tag{17}$$

$$6\text{-}12 \text{ cm} \quad T_{10\text{-}30} = 4{,}11 + 40{,}79\ (1/\varphi) \qquad r = 0{,}65\ ^{**}, \tag{18}$$

on peut supposer que l'un ou l'autre de ces facteurs joue d'une manière plus ou moins déterminante sur la porosité totale y des terres granulaires normales. En effet, quand on étudie y en fonction de $1/\varphi$ et de $T_{10\text{-}30}$ dans une corrélation multiple, on obtient les équations de régression suivantes :

$$0\text{-}6 \text{ cm} \quad y = 36{,}36 + 13{,}3\ (1/\varphi) + 0{,}003\ (T_{10\text{-}30}) \tag{19}$$

$$6\text{-}12 \text{ cm} \quad y = 36{,}33 + 11{,}93\ (1/\varphi) + 0{,}03\ (T_{10\text{-}30}) \tag{20}$$

dont les coefficients de corrélation multiple sont respectivement $R = 0{,}77\ ^{**}$ et $R = 0{,}74\ ^{**}$, qui sont les mêmes que les coefficients de corrélation simple entre y et $1/\varphi$. Cela montre que $T_{10\text{-}30}$ et $1/\varphi$ pris ensemble n'ont pas donné une meilleure corrélation avec y que celle entre ce dernier et $1/\varphi$. Il en découle que c'est plutôt $1/\varphi$ qui explique le mieux les variations de la porosité totale.

e) *Étude de la porosité structurale.*

Les résultats obtenus précédemment suggèrent que les variations de la porosité totale dépendent essentiellement des variations de la porosité structurale, étant

donné que la porosité mottière est assimilable à une porosité texturale qui est une caractéristique constante du matériau. Ceci nous conduit à étudier plus en détail les variations de la porosité structurale en relation avec les paramètres de granulation T_{10} et φ.

Rappelons que les porosités structurales ont été calculées à partir de l'équation de base dans laquelle P_m a été confondu avec P_t :

$$P_s = \left[P_g - P_t\right] \frac{100}{(100 - P_t)} \qquad (21)$$

Les calculs de corrélation entre cette porosité et T_{10-30} ou $1/\varphi$ montrent qu'il n'y a pas de relations significatives avec ce dernier paramètre tant pour les terres granulaires normales que pour les granulaires légères. En revanche, il existe la relation significative suivante dans la couche 0-6 cm entre la porosité structurale y et T_{10-30} pour les terres granulaires normales seulement (fig. 7) :

$$y = 0{,}1289\ (T_{10-30}) - 0{,}6126 \qquad r = 0{,}45\ * \qquad (22)$$

L'équation de régression précédente indique d'une part que lorsque $T_{10} = 100$, autrement dit quand la structure est complètement granulée, la porosité structurale susceptible d'être obtenue est appréciable, de l'ordre de 9 p. 100.

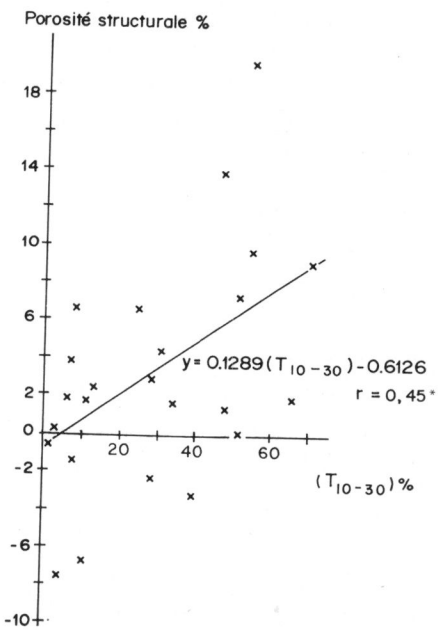


FIG. 7. — *Variation de la porosité structurale y en fonction du degré de développement des structures granulaires normales* (couche 0-6 cm)

Il est à noter d'autre part la présence sur le graphique de quelques valeurs de porosité structurale négatives. Cela peut se produire si la porosité totale devient plus petite que la porosité texturale, à la suite de passages d'engins lourds ou de piétinements dans certaines conditions d'humidité du sol. Toutefois, les données

de l'enquête sont insuffisantes pour affirmer, s'il y a eu, de telles actions de compaction. Par ailleurs, il faut rappeler aussi que nous avons pris, au lieu de la porosité mottière, la porosité texturale qui, dans les conditions précédemment évoquées, peut en différer sensiblement.

Enfin, quand on étudie la porosité structurale (y) en fonction de T_{10-30} et $1/\varphi$ dans une corrélation multiple, la relation obtenue (CCM = 0,45 ; F_{obs} = 2,84) n'est pas meilleure que celle entre y et T_{10-30} seulement.

CONCLUSION

De ce travail, il est possible de tirer plusieurs séries de conclusions.

Les premières portent sur la caractérisation de l'état structural des sols sous prairie de graminées. La comparaison des observations visuelles avec les résultats du tamisage sous alcool nous a permis d'utiliser ce dernier pour distinguer les différents états structuraux observés. Lorsque le taux des éléments de taille inférieure à 10 mm(T_{10}) est inférieur à 10 p. 100, on a affaire à des structures continues. Au-delà de 30 p. 100, les structures sont généralement granulaires et l'on peut considérer que T_{10} devient un *indice de développement* de ce type de structure. Enfin, le caractère log-normal de la distribution dimensionnelle des éléments granulaires permet d'évaluer leur taille moyenne, caractéristique de *la finesse de la granulation.*

Parmi les facteurs qui peuvent commander l'apparition de la granulation, la texture ne paraît pas suffisante pour permettre une prévision de l'état structural que peut prendre une terre sous prairie.

Cependant, la granulation intervient le plus souvent soit sur des terres argileuses et à forte capacité d'échange (structures granulaires dites « normales »), soit au contraire sur des terres légères. Le comportement de ces deux catégories de terres vis-à-vis du phénomène de granulation semble, de ce fait, être régi par des mécanismes très différents.

Dans le cas des structures granulaires normales, le mécanisme de leur formation apparaît conforme à celui suggéré par l'étude expérimentale de Tri (1969) : le caractère argileux du matériau et un taux de gonflement supérieur à 15 p. 100 sont des conditions nécessaires à ce type de granulation. Cette dernière s'effectue semble-t-il par fissuration du matériau, plus ou moins continu au départ, à la suite des gonflements et des retraits causés par un régime hydrique à alternances d'humectations et de dessiccations. Ces processus donnent lieu à des éléments structuraux dont la taille peut être déterminée en suivant un schéma de division qui sera exposé par ailleurs. Toutefois, ce schéma ne s'applique pas aux éléments structuraux des terres granulaires légères qui semblent être produits plutôt par agrégation.

Le mécanisme de formation de cette structure granulaire légère ne peut être envisagé que de façon hypothétique ; cependant, leur richesse relative en matières organiques suggère que ce groupe de constituants joue un rôle essentiel dans leur formation. Par ailleurs, Tri (1969) avait observé une agrégation de matériaux sableux par l'action mécanique directe des poils radiculaires dont Maertens (1970) a montré qu'ils se développaient d'une manière considérable en terres sableuses.

Enfin et surtout, le travail présenté a permis d'analyser les variations de porosité en fonction du type de structure et de son degré de développement.

Dans le cas des structures continues, la porosité résulte essentiellement de la texture du matériau qui commande l'arrangement élémentaire type. A partir du moment où la granulation se manifeste, il apparaît un deuxième système de porosité superposé au précédent, dû à la présence des fissures délimitant les éléments structuraux. En ce qui concerne les terres granulaires normales, la porosité totale qui résulte de la superposition de ces 2 types de porosité est plus directement liée au rapport $1/\varphi$, φ étant la taille moyenne des éléments structuraux. La porosité structurale associée à la présence des fissures varie, quant à elle, proportionnellement à T_{10-30}, c'est-à-dire avec le degré de développement de la structure granulaire. La donnée la plus importante de ce résultat réside dans le fait que ce deuxième type de porosité caractéristique de la structure et dont l'importance vis-à-vis des propriétés physiques et mécaniques du sol est considérable, pourrait atteindre des valeurs très variables par rapport à une moyenne de 9 p. 100 de porosité supplémentaire. Il est donc nécessaire de prendre de grandes précautions au niveau de la prise d'échantillons et des mesures lorsqu'on veut l'évaluer dans chaque cas particulier.

Quant aux terres granulaires légères, l'évolution de leur porosité n'est pas statistiquement reliée aux paramètres de granulation T_{10-30} et $1/\varphi$.

D'autres éléments d'évaluation de cette évolution méritent d'être recherchés. Cet aspect présente, en effet, un intérêt spécial car ces terres, qui ont tendance à se compacter (VAN DER WATT, 1969) peuvent donner lieu sous prairies, et à courte échéance, à des structures granulaires dont le degré de développement est généralement très élevé. Quels sont les facteurs à l'origine de ce changement rapide et les répercussions de ce changement au niveau de la porosité du système? Ce sont autant de questions qui méritent d'être élucidées ultérieurement.

Reçu pour publication en janvier 1973.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont bien voulu nous apporter leur concours pour le choix et la description des situations, ainsi que pour le prélèvement des échantillons : notamment la Direction agronomique, les ingénieurs et les techniciens régionaux de l'I. T. C. F., les Services agronomiques de différentes sociétés d'Économie mixte d'Aménagement et diverses stations de l'I. N. R. A.

Nous tenons également à remercier M. R. BÉTRÉMIEUX pour les critiques et les suggestions qui ont beaucoup contribué à la forme finale de ce mémoire.

Les déterminations classiques ont été effectuées au Laboratoire I. N. R. A. d'Analyses des Sols d'Arras.

SUMMARY

QUANTITATIVE STUDY OF SOIL GRANULATION UNDER GRASSES
I. — GRANULATION PARAMETERS AND THEIR RELATION WITH SOIL POROSITY

Morphological examinations of an important number of samples taken from various soils under young prairies have revealed different structural states which can be characterized by two parameters, obtained from a test, using ethyl alcohol (95 p. 100) as a treatment and sieving liquid.

The first parameter, T_{10}, is a cumulative percentage of structural elements having a diameter smaller than 10 mm, and represents the degree of structural development of the soil.

The second, φ, is the mean size of the above elements and indicates thus their degree of fineness.

Among the soils having a granulating potentiality, two groups were distinguished : the normal granular and the light granular soils. They appeared to be governed by different granulation mechanisms whose consequences were found to be equally different.

Correlation calculations indicate that there is a threshold T_{10} (about 30 p. 100) beyond which the granular structure becomes not only visible but produces an effect by increasing the total porosity of the soil.

Within the soil group termed normal granular, total porosity is significantly related to T_{10-30}, and much more so to $1/\varphi$, these two parameters being themselves interrelated. It was found in addition, that the total porosity variations depend on the structural porosity changes, this type of porosity being defined as the porosity fraction corresponding to the void volumes between structural elements.

ZUSAMMENFASSUNG

QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG
DER BODENGRANULIERUNG UNTER GRASÄHNLICHEN GEBIETEN
I. — PARAMETER DIE GRANULATE STRUKTUR UND IHRE BEZIEHUNGEN MIT
DER BODENPOROSITÄT BESTIMMEN

Bei der morphologischen Untersuchung einer bedeutenden Anzahl von verschiedenen unterhalb junger Grasgebieten entnommener Bodenstichproben, wurden sehr verschiedene Strukturbeschaffenheiten beobachtet, die durch zwei Parameter durch einem Versuch bei dem Äthylalkool bei 95° als Behandlungs-und Siebflüssigkeit verwendet wurde, charakterisiert werden konnten.

Der erste Parameter, T_{10}, ist die Kumulationsrate der Strukturelemente mit einem Durchmesser, der niedriger als 10 mm ist ; er stellt den Entwicklungsgrad der Struktur dar.

Bei dem zweiten, φ, handelt es sich um die Mittelgrösse dieser Elemente ; er zeigt den Feinheitsgrad der Granulierung.

Es wurde festgestellt, dass sich die Böden, die einen deutlichen Teilungszustand aufweisen, in zwei Gruppen unterteilen : normal körnig und leicht körnig, was verschiedene Granulationsmechanismen mit ebenfalls anderen Folgen nach sich zieht.

Korrelationsrechnungen lassen eine Sohle $T_{10} = 30$ p. 100, im Entwicklungsgrad sichtbar werden, ab welcher die Granulation ausser ihrer Sichtbarkeit dazwischentritt, um die gesamte Porosität des Bodens zu steigern. Letztere ist in den normal körnigen Böden bezeichnend mit T_{10-30} verbunden und noch besser mit $1/\varphi$; im übrigen sind diese zwei Parameter sehr voneinander abhängig.

Ausserdem, sind die Variationen der gesamten Porosität in diesen Böden auf die Veränderungen der strukturalen Porosität zurückzuführen, die als Porositätsfraktion bestimmt wird, und welche mit dem eigentlichen Umfang der Spalten zwischen den Strukturelementen übereinstimmt.

РЕЗЮМЕ

Количественное изучение гранулометрии почв под злаковыми лугами. Параметры определяющие гранулометрическую структуру почв и их соотношение с порозностью.

БЮП-ХЬЮ-ТРП.

При морфологическом изучении многочисленных образцов различных почв взятых из под молодых лугов, отмечены были совершенно разные состояния структуры, характеризующиеся с помощью двух параметров,

полученных в результате тестов с применением этилового спирта, в качестве жидкости необходимой для обработки и просеивания.

Первый параметр T_{10} является об' единенным процентом всех элементов структуры диаметр которых меньше 10 мм, и его можно считать степенью развития структуры. Второй — Ø — представляет средние размеры этих элементов или степень мелкозернистости.

Отмечается что почвы с четким разделением гранул можно поделить на две группы почв гранулометрически нормальных и почв гранулометрически легких, с неодинаковым механизмом образования гранул, приводящим к различным последствиям. При рассчете корреляций появляется порог $T_{10} = 30$ % степени развития, начиная от которого степень зернистости становится видимой и начинает увеличивать общую порозность почвы. У почв с нормальной зернистостью эта порозность выраженно связана с T_{10-30}, и еще сильнее с параметрами 1/ и Ø, причем оба последние находятся в тесной зависимости один от другого.

Кроме того, в такого рода почвах изменения общей порозности вызываются также изменениями порозности структурной, определить которую можно как порозность соответствующую об' ему свойственному трещинам между элементами структуры.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bekarewitsch N. E., Burow D. E., Dolgow S. E., Rewut I. B., Schewliagin A. I., 1964. Bodenstruktur und Lebensbedingungen der Pflanzen. *Trans. 8th Intern. Cong. Soil Sci.*, Bucharest, **2**, 251-257.

Brasher B. R., Franzmeier D. P., Valassis V., Davidson S. E., 1966. Use of Saran resin to coat natural soil clods for bulk density and water-retention measurements. *Soil Sci.*, **101** (2), 108.

Bui Huu Tri, 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. agron.*, **19** (4), 415-439.

Bui Huu Tri, 1969. *Dynamique de la granulation du sol sous prairie.* Thèse Docteur ès Sci., Faculté des Sciences Paris.

C. E. T. A. M. A., 1969. *Méthodes statistiques en chimie analytique.* Vol. 2 : *Distribution observée.* Commissariat à l'Énergie atomique, Dunod. Paris.

Fiès J.-C., Faure A., 1972. Étude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, **23** (3), 317-332.

Hénin S., Monnier G., 1956. Évaluation de la stabilité de la structure du sol. *6th Intern. Soil Sci. Cong. Proc.*, Vol. B, 49-52.

Kheyrabi D., Monnier G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152.

Maertens C., 1970. *Influence des conditions de milieu sur l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par les systèmes radiculaires de quelques graminées cultivées.* Thèse Docteur Ing., Université de Toulouse.

Monnier G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Docteur Ing., Université de Paris.

Monnier G., Bui Huu Tri, 1971. Une méthode d'évaluation de la taille des éléments structuraux du sol. *Bull. Ass. Fr. Ét. Sol* (2), 17-27.

Newman E. I., 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.*, **3** (1), 139-145.

Retzer J. L., Russell M. B., 1941. Differences in the aggregation of a Prairie and a Gray Brown Podzolic soil. *Soil Sci.*, **52**, 47-58.

Van der Watt, 1969. Influence of particle size distribution on soil compactibility. *Agrochemophysica*, I, 79-86.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 425-436.

ÉTUDE DE L'HYDRATATION DE LA MONTMORILLONITE CALCIQUE EN PRÉSENCE D'ÉTHYLÈNE-GLYCOL

P. CHASSIN

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

Dans ce travail, on a étudié le comportement de la montmorillonite calcique de Camp-Berteau (Maroc) soumise à des atmosphères d'eau et d'éthylène-glycol de composition variable. Les isothermes d'adsorption, réalisées à 20°C, ont été effectuées soit sur l'argile seule (systèmes non traités), soit sur le complexe montmorillonite-éthylène-glycol (systèmes prétraités).

L'expérience montre que les quantités d'eau et d'éthylène-glycol adsorbées par les systèmes non-traités et prétraités sont égales tant que l'humidité relative est inférieure à 80 p. 100. Au-delà de cette limite, les quantités fixées par les systèmes prétraités sont très supérieures à celles retenues par les systèmes non-traités.

Une étude plus précise montre que la présence d'éthylène-glycol préalablement adsorbé provoque la formation d'une phase liquide et que les états d'équilibre sont du type phase solide-phase liquide. La comparaison des différents résultats permet de définir un mécanisme d'action de l'éthylène-glycol pour la rétention de l'eau.

I. — INTRODUCTION

Un certain nombre d'auteurs ont étudié l'adsorption de l'eau et de l'éthylène-glycol (EG) par les argiles et, en particulier, par la montmorillonite. Néanmoins peu de renseignements ont été obtenus sur les phénomènes d'adsorption lorsqu'un minéral argileux est mis simultanément en présence de ces deux composés. Or cette étude présente un double intérêt parce qu'elle permet d'une part, d'étudier la compétition de ces deux types de molécules au niveau des sites d'adsorption de l'argile et, d'autre part, l'expérience montre que, dans certaines conditions, l'adsorption simultanée des deux constituants est très supérieure à la somme des adsorptions élémentaires. Le but de ce travail est d'étudier les processus permettant d'expliquer ce comportement.

II. — MATÉRIEL ET BASES EXPÉRIMENTALES

La montmorillonite a été choisie en raison de la forte activité qu'elle manifeste vis-à-vis des phénomènes d'adsorption. Les expériences sont effectuées sur la fraction inférieure à 2 μ, extraite par sédimentation d'un matériau provenant du gisement de Camp-Berteau (Maroc). Sa formule structurale est :

$$M^{+}_{0,39}\ [(Al^{3+}_{1,46}Fe^{3+}_{0,15})\ Mg^{2+}_{0,39}]\ (Si)_4\ O_{10}(OH)_2$$

Sa capacité d'échange est de 104 méq pour 100 grammes de minéral séché à 130°C. Cette référence a été choisie parce qu'après dessiccation à cette température, la montmorillonite Ca^{++} conserve d'une part, toutes ses propriétés adsorbantes et, d'autre part, retient peu d'eau : de l'ordre de 1 à 2 p. 100 du poids de l'argile déshydratée mais ayant gardé son eau de constitution.

La montmorillonite a été rendue monoionique par échange d'ions avec une solution de $CaCl_2$. Pour conduire les expériences, les échantillons ont été préparés de deux façons différentes. D'une part, les échantillons sont des films obtenus par évaporation lente d'une suspension sur du mylar. Ces films sont rassemblés par paquets d'environ 200 mg ; chacun d'entre eux permet de réaliser une expérience d'adsorption. D'autre part, pour contrôler l'espacement interfeuillet de l'argile, des dépôts d'environ 70 mg sont réalisés sur des lamelles couvre-objet de microscope pesant environ 300 mg. Le conditionnement de ces dépôts est réalisé en même temps que les films. On admet qu'il y a identité des contenus adsorbés sur les dépôts et les films lorsque les teneurs pondérales en adsorbant sont égales ; ces teneurs seront exprimées par la suite en gramme pour 100 grammes d'argile séchée à 130°C.

A. — *Obtention des isothermes d'adsorption*

Trois types d'isothermes ont été obtenus sur les films.

a) L'isotherme simple d'adsorption de l'eau dans une atmosphère où l'humidité relative est contrôlée par des solutions eau-H_2SO_4 (index 5 sur les figures).

b) Un deuxième type d'isotherme a été obtenu en plaçant l'argile Ca^{++} dans une atmosphère en équilibre avec des solutions eau-EG. La tension de vapeur de tels mélanges est essentiellement due à l'eau car, à 20°C, la pression de vapeur saturante de l'EG n'est que de 0,1 mm de mercure contre 17,5 mm pour l'eau. Il s'ensuit, en première approximation, que l'on peut assimiler tension de vapeur de ces solutions avec tension de vapeur d'eau. Il sera donc nécessaire d'attendre plusieurs jours pour obtenir les états d'équilibre, l'EG ne s'adsorbant que très lentement. Pour tous les points de l'isotherme, on s'est assuré, sur une série d'échantillons, que l'on avait obtenu un état d'équilibre en déterminant le poids et la composition de la phase adsorbée, ces deux valeurs devant être constantes.

c) Le troisième type d'isotherme est obtenu dans des conditions analogues à *b*, mais en utilisant, au départ, le complexe classique montmorillonite Ca^{++}-EG (250 mg d'EG par gramme d'argile) au lieu de l'argile Ca^{++} seule. Par la suite, nous les appellerons échantillons prétraités par opposition aux échantillons non traités (conditions *b*). Ce complexe est obtenu de la façon suivante : après avoir fait adsorber, à partir de vapeurs d'EG, des quantités supérieures à 25 p. 100, on réalise une désorption à l'étuve jusqu'à l'obtention du complexe correspondant au recouvrement monomoléculaire des surfaces. L'examen des échantillons par spectroscopie infrarouge permet d'affirmer que les complexes ainsi préparés sont exempts d'eau.

B. — *Pression de vapeur des solutions eau - éthylène - glycol*

Compte tenu de la remarque faite précédemment, on peut caractériser chaque solution eau - EG par une humidité relative p/po où p représente la pression de vapeur et po la pression de vapeur saturante de l'eau à 20°C. Les pressions de vapeur p de chaque solution ont été mesurées sous vide avec un manomètre à huile. Les résultats obtenus (tabl. 1) sont en bon accord avec ceux de GALLANT (1967) et de WELLISCH *et al.* (1961).

TABLEAU I

Humidités relatives en équilibre avec les solutions eau-éthylène-glycol

Titre pondéral en eau	Fraction molaire en eau	HR (%)	Titre pondéral en eau	Fraction molaire en eau	HR (%)
0,9	0,969	96,5	0,2	0,463	44
0,8	0,932	92,7	0,1	0,277	26,5
0,7	0,89	88	0,075	0,219	21,4
0,6	0,838	83	0,05	0,154	15
0,5	0,775	75	0,025	0,08	8
0,4	0,697	66	0,012 5	0,058	6
0,3	0,596	57			

C. — *Caractérisation de la phase adsorbée.*

Pour chaque état d'équilibre, la phase adsorbée est caractérisée par sa composition. La pesée des échantillons permet d'obtenir la somme des quantités d'eau et d'EG adsorbées. Les quantités d'EG sont ensuite déterminées par dosage sur chaque échantillon et les quantités d'eau sont évaluées par différence.

D. — *Dosage de l'éthylène-glycol.*

Les échantillons d'argile sont placés dans une quantité d'eau telle que l'on obtienne une concentration d'environ 1 mg d'EG par cm^3 de solution de manière à ce que le dosage ultérieur de l'EG par oxydation sulfochromique s'effectue dans de bonnes conditions. La suspension obtenue après l'immersion de l'échantillon est floculée par 0,5 cm^3 d'H_2SO_4(N) et centrifugée. 5 cm^3 de surnageant sont prélevés et mélangés à 10 cm^3 d'une solution sulfochromique de composition : 11,768 g de $K_2Cr_2O_7$ par litre, 1 000 g de H_2SO_4 par litre. Après la réduction, on ajuste tous les volumes à 50 cm^3 et on mesure la densité optique à 5 840 Å (ions Cr^{3+}) avec des cuves de 3 cm d'épaisseur. Dans ces conditions de dosage, 10 mg d'EG donnent une densité optique de 0,6.

Quelques expériences préliminaires ont permis de vérifier que tout l'EG adsorbé sur de la montmorillonite est dosé de cette façon, et que lorsqu'on opère avec une argile dépourvue d'EG, il n'y a pas de réduction appréciable du bichromate.

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les isothermes d'adsorption sont reproduits sur la figure 1. La courbe n° 5 correspond à l'isotherme d'adsorption en présence de vapeur d'eau, les courbes *a* et *b* correspondent aux quantités d'eau et d'EG fixées respectivement par les systèmes non traités et prétraités dans une atmosphère en équilibre avec les solutions eau-EG.

On constate qu'aux faibles humidités relatives, donc à des pressions partielles élevées pour l'EG, les quantités adsorbées sont très supérieures à celles fixées par l'argile en présence d'eau seule. Si l'on se place aux fortes humidités relatives, donc à des pressions partielles faibles pour l'EG, on constate que l'argile non traitée fixe sensiblement le même poids d'adsorbat (eau + EG) que l'argile avec l'eau. Par contre, l'argile prétraitée fixe une quantité totale très supérieure. Par exemple, à une humidité relative de 95 p. 100, ces quantités varient de 40 p. 100 environ à 110 p. 100 (rapport de 1 à 2,75).

Sur la figure 2, on a reporté les quantités de chaque constituant fixé par l'argile

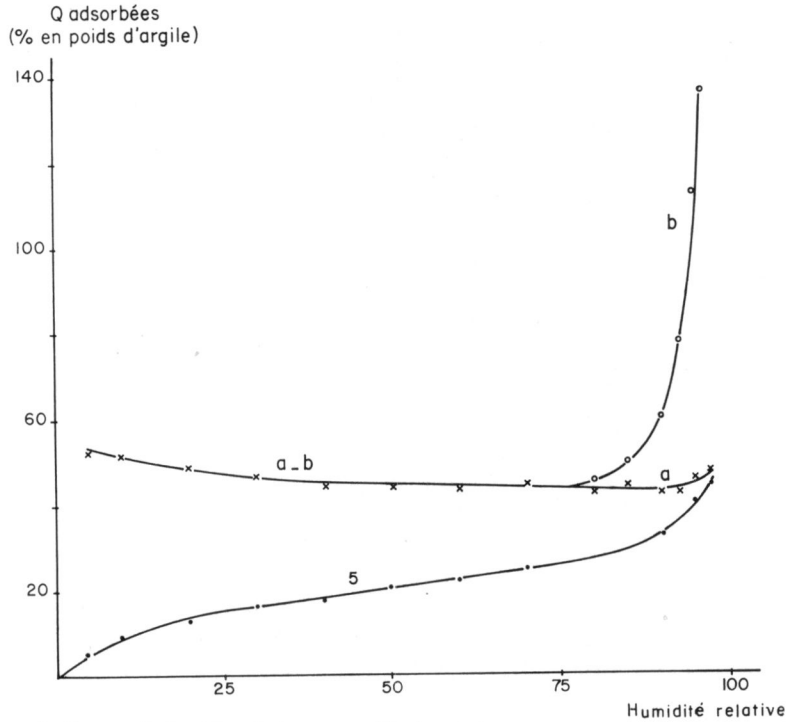


FIG. 1. — *Isothermes d'adsorption de la montmorillonite calcique au contact soit de la vapeur d'eau* (5), *soit d'une vapeur mixte d'eau et d'éthylène-glycol*

(a : systèmes non traités ; b : systèmes prétraités)

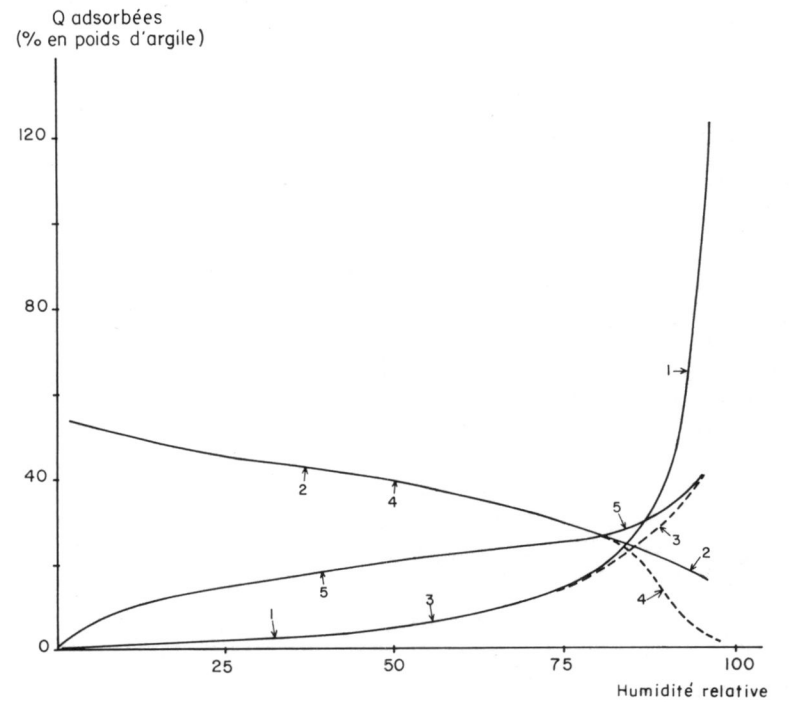


FIG. 2. — *Isothermes d'adsorption d'eau* (1 et 3) *et d'éthylène-glycol* (2 et 4) *pour les systèmes respectivement prétraités et non traités*

La courbe 5 représente l'isotherme classique d'adsorption d'eau

en fonction de l'humidité relative. Aux faibles humidités relatives, les quantités d'eau fixée par les systèmes non traités et prétraités sont très inférieures à celles qui sont retenues en présence d'eau. Ce fait met en évidence la compétition entre l'eau et l'EG au niveau des sites d'adsorption. Il faut toutefois rappeler que, dans cette région de l'isotherme, l'EG est au voisinage de sa pression de vapeur saturante. De ce fait, il se trouve adsorbé en grandes quantités, lesquelles sont égales, que l'argile soit prétraitée ou non. L'examen des résultats montre que les quantités d'eau fixée dans les deux conditions expérimentales sont aussi égales. Cette coïncidence des états d'équilibre se poursuit jusqu'à des humidités relatives d'environ 80 p. 100. A partir de cette valeur, la quantité d'eau retenue par l'argile prétraitée augmente considérablement alors que corrélativement la quantité d'EG décroît. Pour les systèmes non traités, les quantités d'eau fixée augmentent très régulièrement pour atteindre celles que retient l'argile Ca^{++} en présence d'eau seulement. On remarquera que la divergence des quantités d'eau retenue par les argiles prétraitées et non traitées va de pair avec celles d'EG, ces dernières étant toujours plus faibles pour les systèmes non traités.

Pour préciser davantage nos systèmes, il est nécessaire de se reporter aux mesures des distances interfeuillets. L'équidistance *ool* moyenne ou apparente (tabl. 2)

TABLEAU 2

Caractéristiques des diagrammes de diffraction des argiles Ca^{++} non traitées et prétraitées.

HR (%)	Titre pondéral de la solution en EG	Systèmes non traités				Systèmes prétraités			
		Nombre de raies observées	*dool* moyen	*dool* apparent	Nature du diagramme	Nombre de raies observées	*dool* moyen	*dool* apparent	Nature du diagramme
$\leqslant 75$	$\leqslant 0,5$	6	16,9 Å		R	6	16,9 Å		R
83	0,4	6	17 Å		R	6	17 A		R
88	0,3	6	17,2 Å		R	6	17 Å		R
92,7	0,2	6		17,1 Å	I	6	17,1 Å		R
96,5	0,1	5		15,9 Å	I	6		19,3 Å	I

des systèmes non traités reste sensiblement constante jusqu'à une humidité relative de 92, 7 p. 100 et tombe à 15, 9 Å pour une humidité relative de 96,5 p. 100. Ces résultats appellent deux remarques :

a) Les quantités d'EG fixées aux basses humidités relatives sont supérieures à 25 p. 100, avec un espacement interfeuillet de 17 Å. Or, on sait par ailleurs (Mac Ewan, 1958 ; Reynolds, 1965) que le recouvrement total des surfaces de la montmorillonite par l'EG correspond à 250 mg par gramme d'argile avec un espacement voisin de 17 Å. Dans ces conditions, il y a présence d'une phase interfeuillet et d'une phase interagrégat.

b) Un raisonnement analogue peut être tenu aux fortes humidités relatives pour les argiles prétraitées. Le volume interfeuillet est insuffisant pour insérer les

quantités d'eau fixée à l'équilibre. Là encore, on est obligé d'admettre la présence d'une phase interfeuillet et d'une phase interagrégat.

Le problème est donc d'examiner plus en détail la répartition des liquides adsorbés entre l'espace interfeuillet et l'espace interagrégat.

IV. — DISCUSSION ET INTERPRÉTATION

Dans cette partie, on étudiera d'abord les systèmes prétraités et non traités aux faibles humidités relatives, puis les systèmes non traités aux fortes humidités relatives. On a choisi cet ordre parce que l'interprétation des propriétés de ces systèmes permettra de comprendre le comportement particulier des systèmes prétraités aux fortes humidités relatives.

A. — *Étude des argiles prétraitées et non traitées aux faibles humidités relatives*

On a déjà signalé qu'avec les critères d'observation utilisés dans ce travail, ces systèmes apparaissent identiques dans un domaine d'humidités relatives compris entre 0 et 80 p. 100 environ, et qu'ils sont caractérisés par la présence simultanée de phases interfeuillet et interagrégat. Pour définir les états d'équilibre d'une façon plus synthétique, on a comparé le titre pondéral de la phase adsorbée (g d'EG par g de phase adsorbée) à celui de la solution utilisée pour fixer les humidités relatives (fig. 3) afin de définir un coefficient de sélectivité apparent. On constate que l'argile Ca^{++} présente une sélectivité apparente pour l'EG dans tous ces domaines (titre pondéral de la solution variant de 1 à 0,55 environ). Pour essayer de caractériser davantage les phases interfeuillet et interagrégat, on va décrire les systèmes de la façon suivante :

1° Les surfaces de l'argile sont recouvertes d'une couche monomoléculaire d'EG, c'est-à-dire 250 mg d'EG par gramme d'argile. Dans cette hypothèse, en accord avec les résultats observés par diffraction des rayons X, on suppose donc que la sélectivité des surfaces pour l'EG est totale.

2° L'espace interagrégat ne présente aucune sélectivité pour l'EG, c'est-à-dire qu'il contient une solution eau-EG de même composition que celle utilisée pour fixer les humidités relatives.

Dans ces conditions, il est possible de faire un bilan des quantités adsorbées. Par exemple, à une humidité relative de 15 p. 100 fixée par une solution de titre pondéral 0,95 p. 100, l'argile Ca^{++} fixe 48,5 p. 100 d'EG et 0,5 à 1 p. 100 d'eau. Ainsi 48,5 — 25 = 23,5 p. 100 d'EG sont présents dans l'espace interagrégat et fixent $23{,}5 \times \frac{5}{95} = 1{,}24$ p. 100 d'eau. Dans le tableau 3, on a calculé ces valeurs pour différentes humidités.

Il y a un bon accord entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales jusqu'à une humidité relative de 55 à 60 p. 100 et des divergences apparaissent dès que la sélectivité apparente de l'argile pour l'EG décroît. Dans ces conditions, le

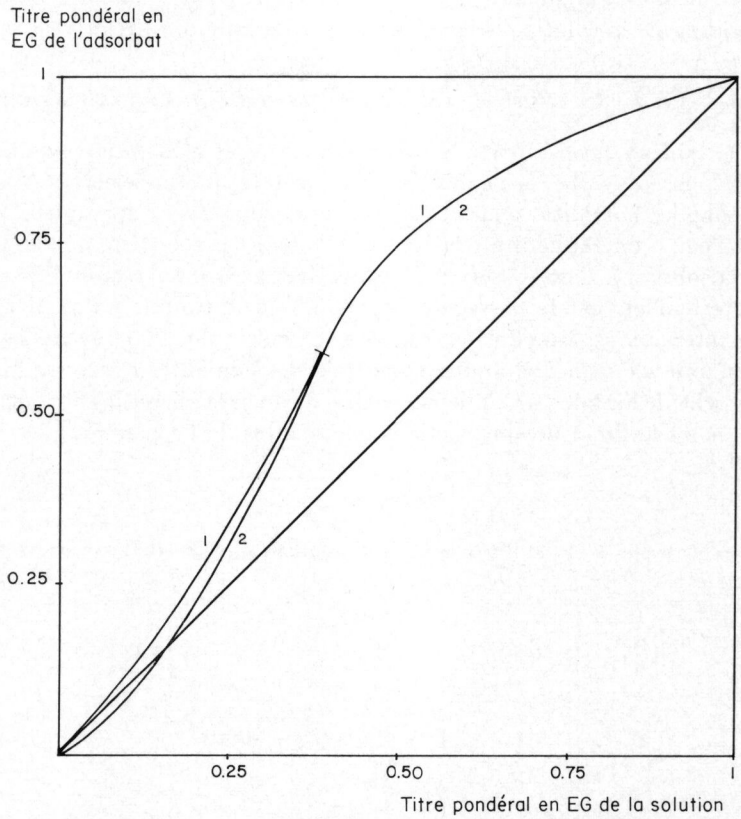


FIG. 3. — *Diagramme de sélectivité apparente de la montmorillonite calcique prétraitée* (1) *et non traitée* (2)

TABLEAU 3

Quantités théoriques d'eau externe adsorbées sur l'argile Ca^{++} dans l'hypothèse d'un recouvrement monomoléculaire des surfaces par l'éthylène-glycol.

HR (%)	Composition de la solution		Quantité d'EG à l'équilibre (%)	Quantité d'eau théorique (%)	Quantité d'eau expérimentale (%)
	EG	H_2O			
15	0,95	0,05	48,5	1,24	0,5-1
26,5	0,9	0,1	46	2,33	1,5-2
44	0,8	0,2	40,5	3,87	2,5-3
57	0,7	0,3	37,5	5,36	5
66	0,6	0,4	32,5	5	6,5

diagramme de sélectivité présenté dans la figure 3 ne représente pas la sélectivité vraie des surfaces de l'argile parce qu'on tient compte d'une phase interagrégat qui a la composition de la solution utilisée pour fixer les humidités relatives.

B. — *Étude des systèmes non traités aux fortes humidités relatives*

Dans le tableau 4, on a porté les quantités d'eau et d'EG, ainsi que la composition de la phase adsorbée à l'équilibre. On constate que la sélectivité pour l'EG décroît lorsque les humidités relatives augmentent pour laisser apparaître une sélectivité pour l'eau à une humidité relative voisine de 95 p. 100 (titre pondéral de 0,85 en EG de la solution). Cette observation est en bon accord avec la mesure des espacements interfeuillets car le passage de 17 Å à 15,9 Å traduit un changement au niveau des interactions. En effet, un espacement voisin de 17 Å révèle des interactions dominantes de type EG-argile, alors qu'à des humidités relatives plus élevées, on se rapproche de l'argile Ca^{++} à deux couches d'eau caractérisée par un espacement de 15,5 Å, c'est-à-dire à des interactions dominantes de type eau-argile.

TABLEAU 4

Quantités moyennes d'eau et d'EG trouvées à l'équilibre sur l'argile Ca^{++} non traitée.

HR (%)	TPSE(1)	H_2O (%)	EG (%)	TPPA(1)
77,5	0,5	11,5	31,5	0,73
83	0,4	16	27	0,63
88	0,3	25	16	0,39
92,7	0,2	32	10	0,238
96,5	0,1	44	4	0,083

(1) TPSE, TPPA : titre pondéral en EG respectivement de la solution en équilibre avec HR et de la phase adsorbée [poids (EG) / poids (eau + EG)].

C. — *Étude des systèmes prétraités aux fortes humidités relatives*

L'examen de l'isotherme d'adsorption (figure 2, courbe 1) montre que, dans ce cas, les quantités d'eau retenues à l'équilibre sont, pour des humidités relatives élevées, très supérieures à celles que l'on peut trouver sur l'argile Ca^{++} sans molécules organiques et sous des humidités relatives correspondantes.

1. *Caractérisation des systèmes.*

a) On constate que la divergence entre les quantités d'eau retenues par les systèmes prétraités et non traités va de pair avec celle observée pour l'EG ; ceux-ci ayant toujours des quantités inférieures à ceux-là. Cette comparaison met en évidence le rôle de l'EG apporté par le prétraitement dans la fixation de l'eau. Le diagramme de sélectivité indique que la composition de la phase adsorbée, pour des humidités

relatives supérieures à 90 p. 100, est très voisine de celle des solutions utilisées pour conditionner les échantillons. De plus, si on compare les quantités d'eau et d'EG trouvées à l'équilibre aux espacements interfeuillets, on peut conclure que ces systèmes sont caractérisés par la présence d'une phase liquide interagrégat particulièrement importante.

b) La comparaison des espacements interfeuillets observés dans cette expérience avec ceux donnés par BRINDLEY et *al.* (1969) permet de confirmer la présence de cette phase liquide interagrégat. Ces auteurs ont déterminé l'ouverture d'une montmorillonite Ca^{++} immergée dans des solutions d'eau et d'EG de différentes fractions molaires. L'identité des variations observées dans les deux cas entraîne des conditions analogues ; c'est-à-dire que les systèmes prétraités aux fortes humidités relatives sont en équilibre avec une phase liquide interagrégat.

En conclusion, les systèmes prétraités aux fortes humidités relatives sont définis par la présence d'une phase solide : la montmorillonite Ca^{++}, en équilibre avec une phase liquide interagrégat de même composition que la solution utilisée pour conditionner les échantillons. Cette dernière, en équilibre avec la phase vapeur, va imposer le contenu et les espacements interfeuillets. On comprend alors pourquoi les espacements interfeuillets des systèmes prétraités sont différents de ceux des systèmes non traités ; ceux-ci étant caractérisés par un équilibre phase solide-phase vapeur alors que ceux-là sont définis par un équilibre phase solide-phase liquide.

2. *Mécanisme de la condensation.*

L'examen de la courbe 1 figure 2 indique un phénomène analogue à la condensation capillaire susceptible d'être décrit par la loi de Kelvin.

$$\frac{P}{P_0} = e^{-\frac{2\gamma \overline{V} \cos \alpha}{r RT}}$$

où
- γ : tension superficielle
- α : angle de raccordement
- $\overline{V}$: volume molaire
- r : rayon du pore
- R : constante des gaz parfaits
- T : température absolue
- P/P_0 : pression partielle au-dessus du ménisque.

L'importante condensation observée sur les systèmes traités traduit un fort abaissement de la pression partielle au-dessus du ménisque. Pour un diagramme de porosité donné, cet abaissement ne pourra être dû qu'à une augmentation de γ ou de $\cos \alpha$. Le phénomène de condensation devrait donc être plus intense sur l'argile Ca^{++} sans matière organique (courbe 5) que sur les systèmes prétraités car la tension superficielle d'une solution d'eau et d'EG est inférieure à celle de l'eau (GALLANT, 1967). La seule possibilité pour traduire ce phénomène est donc une augmentation de $\cos \alpha$, c'est-à-dire une plus grande mouillabilité du minéral. Il est impossible d'apporter une réponse directe à ce problème par suite de la méconnaissance de l'angle de raccordement phase solide-phase liquide. Néanmoins la comparaison de l'hydratation des systèmes non traités et de l'argile Ca^{++} sans matière organique (courbes 3 et 5, fig. 2) fournit la réponse. Si la présence d'EG modifiait d'une façon importante

l'angle de contact, on devrait observer une fixation d'eau plus importante sur les systèmes non traités (courbe 3) que sur l'argile sans matière organique (courbe 5, fig. 2). Or, ceci est infirmé par l'expérience ; ce qui signifie que le ou les facteurs responsables de la condensation ne sont pas d'origine capillaire.

On a déjà montré sur les systèmes non traités que la sélectivité de l'argile pour l'EG diminue lorsque les humidités relatives augmentent; cette sélectivité disparaît même au profit de l'eau aux très fortes humidités relatives. Dans ces conditions et dès que l'argile prétraitée sera placée à des humidités relatives élevées, il va y avoir une redistribution des molécules au niveau des surfaces ; c'est-à-dire que des molécules d'eau vont remplacer des molécules d'EG au niveau des surfaces. Si les molécules d'EG en excès apportées par le prétraitement pouvaient migrer vers la solution d'équilibre, les états d'équilibre de ces systèmes seraient alors identiques à ceux des systèmes non traités. Néanmoins, du fait de la très faible pression de vapeur de l'EG, c'est-à-dire de sa très faible volatilité, ces molécules ne vont pas migrer mais s'hydrater dans l'espace interagrégat pour égaliser leur potentiel chimique avec celui de la solution. En définitive, la forte adsorption d'eau par les argiles prétraitées aux fortes humidités relatives est régie par un équilibre osmotique. La solution interagrégat, en équilibre avec la phase vapeur, va imposer à l'argile des caractéristiques analogues à celles que l'on trouve dans des conditions d'immersion (BRINDLEY, 1969).

V. — CONCLUSION

La comparaison des systèmes eau-argile, eau-EG-argile et eau-argile prétraitée par l'EG met en évidence des particularités propres à ce dernier système. Elles sont essentiellement dues à la désorption de l'EG préalablement fixé lorsque la tension de vapeur d'eau croît, cette situation n'apparaissant pas quand l'argile est mise directement dans une atmosphère d'eau et d'EG. L'obtention d'équilibres sur les systèmes prétraités aux fortes humidités relatives implique que la phase interagrégat d'eau et d'EG ait le même potentiel chimique que la solution utilisée pour fixer la composition de la phase vapeur. Il se produit donc un équilibre osmotique entre la solution de contrôle et la solution interagrégat.

Toutefois, au phénomène osmotique vient certainement se superposer un abaissement du potentiel chimique de l'eau dû aux forces capillaires. Ceci doit donner la possibilité de fixer la dimension des pores de l'argile où se loge la phase interagrégat. Ces dimensions seraient une limite supérieure car le rayon de courbure du ménisque doit imposer une stabilité thermodynamique au système.

Ces expériences doivent non seulement permettre d'évaluer la compétition de molécules polaires au niveau des sites d'adsorption de l'argile, mais aussi de fixer un ordre de grandeur des dimensions des capillaires de l'argile hydratée.

Reçu pour publication en mars 1973.

SUMMARY

STUDY OF THE HYDRATION OF CALCIUM MONTMORILLONITE IN THE PRESENCE OF ETHYLENE GLYCOL

The behaviour of Camp Berteau calcium montmorillonite exposed to atmospheres of variable composition in water and ethylene glycol was studied. Adsorption isotherms were carried out at constant temperature (20°C) either on clay alone (non-treated systems) or on the montmorillonite ethylene glycol complex (pre-treated systems).

The experiment shows that the quantities of water and ethylene-glycol adsorbed by the non-treated and pre-treated systems are equal so far as the relative humidity does not exceed 80 p. 100. Beyond this limit, the quantities fixed by the pre-treated systems are much greater than those retained by the non-treated systems.

A more detailed study shows that the presence of previously adsorbed ethylene-glycol induces the formation of a liquid phase and that the states of equilibrium are of the solid phase-liquid phase type. A comparison between the different results provides an explanation of the role of ethylene glycol in water retention.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER HYDRATATION VON KALZIUMMONTMORILLONIT IN ANWESENHEIT VON ÄTHYLENGLYKOL

In dieser Arbeit wurde das Verhalten des Kalzium-montmorillonits von Camp Berteau untersucht, der Wasser-und Äthylenglykolatmosphären verschiedener Zusammensetzung ausgesetzt wurde. Die bei 20° erhaltenen Adsorptionsisotherme wurden entweder auf Ton allein (nicht behandelte Systeme) oder am Komplex Montmorillonit-Äthylenglykol (vorbehandelte Systeme) hergestellt.

Die Erfahrung zeight, dass die von den nichtbehandelten und vorbehandelten Systemen absorbierte Wasser- und Äthylenglykolmengen gleich sind, solange die relative Feuchtigkeit (80 p. 100 nicht übersteigt. Bei Überschreitung dieser Grenze sind die von den vorbehandelten Systemen gebundenen Mengen wesentlich höher als die der unbehandelten Systemen.

Eine genauere Untersuchung zeigt, dass das Vorhandensein von vorher adsorbiertem Äthylenglykol zur Bildung einer flüssigen Phase führt und dass die Gleichgewichtszustände von der Art feste Phase-flüssige Phase sind. Der Vergleich der verschiedenen Ergebnisse gestattet es, den Wirkungsmechanismus von Äthylenglykol bei der Wasserbindung zu definieren.

РЕЗЮМЕ

Изучение гидратации известкового монтмориллонита в присутствии этилен-гликоля.

П. ШАССЕН.

Данная работа посвящена изучению поведения известкового монтмориллонита из Камп Берто в условиях различной влажности и присутствия разных количеств этилен-гликоля. Изотермы адсорбции только для глины (необработанные системы) и для комплекса монтмориллонит — этилен-гликоль (предварительно обработанные системы) были реализованны при температуре в 20 °С.

Опыт показал, что количества влаги и этилен-гликоля адсорбированные необработанными системами, равны количествам адсорбированным системами предварительно обработанными когда относительная влажность не превышает 80 %. Если эту границу перейти, количества влаги и этилен-гликоля связывающиеся предварительно обработанными системами становятся сразу выше количеств задержанных системами необработанными.

Уточнение изучения показывает, что присутствие предварительно адсорбированного этилен-гликоля вызывает образование жидкой фазы и что состояния равновесия становятся типом твердая фаза — жидкая фаза. Сравнение полученных результатов позволяет определить механизм действия этилен-гликоля на задержание влаги.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Brindley G. W., Wiewiora K., Wiewiora A., 1969. Intracrystalline swelling of montmorillonite in some water organic mixtures. (Clay organic studies, XVII). *Amer. Mineral.*, **54**, 1635-1644.

Gallant R. W., 1967. Physical properties of hydrocarbons. Part. 13. Ethylene glycols hydrocarbon. *Process*, **46** (4), 183-196.

Mac Ewan D. M. C., 1948. Complexes of clays with organic componds. Part. I. Complex formation between montmorillonite and halloysite and certain organic liquids. *Trans. Faraday Soc.*, **44**, 349-367.

Reynolds R. C., 1965. An X-Ray study of an ethylene glycol montmorillonite complex. *Amer. Mineral.*, **50**, 990-1001.

Wellisch E., Hagan L., Marker L., Sweeting O. J., 1961. Interaction of cellulose with small molecules. II. Ethylenediamine, ethylene glycol and tetramethylene sulfone. *J. Poly. Sci.*, **51**, 263-277.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 437-455.

ÉVAPOTRANSPIRATION COMPARÉE DE DIFFÉRENTES CULTURES ET ÉTUDE DE QUELQUES FACTEURS INFLUENÇANT LES RYTHMES DE CONSOMMATION

J. PUECH et M. HERNANDEZ

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Toulouse, I. N. R. A.,
B. P. 12, 31320 Castanet Tolosan

RÉSUMÉ

Les évapotranspirations de différentes cultures d'été (maïs, sorgho, soja, tournesol) ont été comparées à l'évapotranspiration potentielle (ETP) mesurée sur fétuque élevée de manière à déterminer les rapports de consommation $\frac{ET}{ETP}$ et à définir les facteurs pouvant les influencer. Ainsi, les conditions pédoclimatiques, les contraintes hydriques et les aspects variétaux ont notamment été analysés sur le maïs. Enfin, il est apparu que certaines cultures (maïs tardifs, tournesol, soja) pouvaient dépasser nettement l'ETP « fétuque » pendant la phase de formation des grains, ce qui pose de nouveaux problèmes au niveau de la connaissance des végétaux de grande culture.

INTRODUCTION

Devant l'extension actuelle des cultures irriguées et les implications qu'elles comportent sur le plan économique (infrastructure, périmètres irrigables), de nombreuses études ont contribué à aborder progressivement, à différents niveaux, les divers aspects du problème. En effet, la conduite d'une irrigation dite rationnelle ne peut guère faire l'objet de recettes simples ; elle nécessite d'abord la connaissance des besoins en eau des espèces cultivées selon les stades physiologiques (Godard, 1959 ; Robelin, 1962 ; Puech *et al.*, 1968 ; Bouchet, Robelin, 1969 ; Rollier, 1970 ; Robelin, Mingeau, 1971) mais elle sous-entend aussi la connaissance du comportement des sols selon leur nature et leur profondeur (Burgevin, Hénin,

1943 ; FIORAMONTI *et al.*, 1967), de l'efficience de l'eau consommée (MARTY, PUECH, 1971), de l'influence sur la production de déficits hydriques à des époques physiologiquement critiques (ROBELIN, 1962-1967 ; LANGLET, 1971), l'importance de facteurs techniques et agronomiques (PUECH *et al.*, 1969 ; BLANCHET *et al.*, 1971). Aussi, dans le but de synthétiser et d'utiliser au mieux ces données pour une année climatique donnée, des avertissements irrigations plus ou moins complexes selon le degré de précision recherchée ont été conçus et diffusés (ROBELIN, 1969 ; PUECH, COMBRET, 1969 ; GOELLNER, 1969, etc.).

Les résultats obtenus sont encore fragmentaires et l'étude expérimentale, notamment de l'évapotranspiration des végétaux de grande culture, présente toujours une grande acuité. On distingue habituellement les cultures à activité physiologique et couverture du sol permanentes, et celles à activité cyclique. Le premier type de culture permet de réaliser l'évapotranspiration potentielle (ETP) lorsque les facteurs physiques, chimiques et hydriques sont à l'optimum. Divers travaux ont montré que les phénomènes étaient très voisins chez plusieurs espèces ; les consommations d'eau dans le temps suivent les fluctuations de la demande climatique. Un étalon plante servant de référence, la fétuque élevée variété *Manade*, a été retenu en France depuis plusieurs années. Par contre, dans le cas des cultures de type annuel, l'évapotranspiration maximale (ETM) dépend à tout moment du degré de couverture du sol et des stades végétatifs : levée, croissance, apparition du stade reproducteur, maturation. Dans ces conditions, l'ETM ne serait égale à l'ETP que dans un laps de temps plus ou moins long. On obtient alors un rapport de consommation $\frac{ETM}{ETP} \leqslant 1$ et l'ETP serait la courbe enveloppe des ETM des divers végétaux se succédant dans le temps (BOUCHET et ROBELIN, 1969).

A partir de ces considérations, nous avons comparé, sur plusieurs années, l'évapotranspiration de différentes plantes annuelles d'été : maïs, sorgho, tournesol, soja, à l'ETP d'une prairie de fétuque élevée. Ces études ont eu pour but d'une part, de suivre l'évolution des rapports de consommation, et d'autre part, de préciser, sur une culture déterminée, les modalités de variation de ce rapport en fonction des conditions pédoclimatiques, des variétés et du degré de participation des réserves hydriques du sol. Ces données permettent ainsi d'aborder les relations existant entre les rythmes de consommation $\frac{ETR}{ETM}$ et la production, et également d'envisager les modalités d'irrigation en tenant compte des caractéristiques des espèces et des contraintes du milieu, ainsi que certaines répercussions au niveau des divers systèmes de cultures sèches ou irriguées.

I. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

A. — *Mesures d'évapotranspiration*

Les mesures d'évapotranspiration potentielle et maximale, sont réalisées sur une parcelle expérimentale de 1 ha, subdivisée en 3 parties égales comprenant chacune une batterie de 2 évapotranspiromètres de 3 m², à plan d'eau à profondeur réglable ; chaque anneau de garde, supérieur à 3 000 m², est donc très important. Cet ensemble se trouve au sein d'un dispositif expérimental de 13 ha dont 5 irrigués.

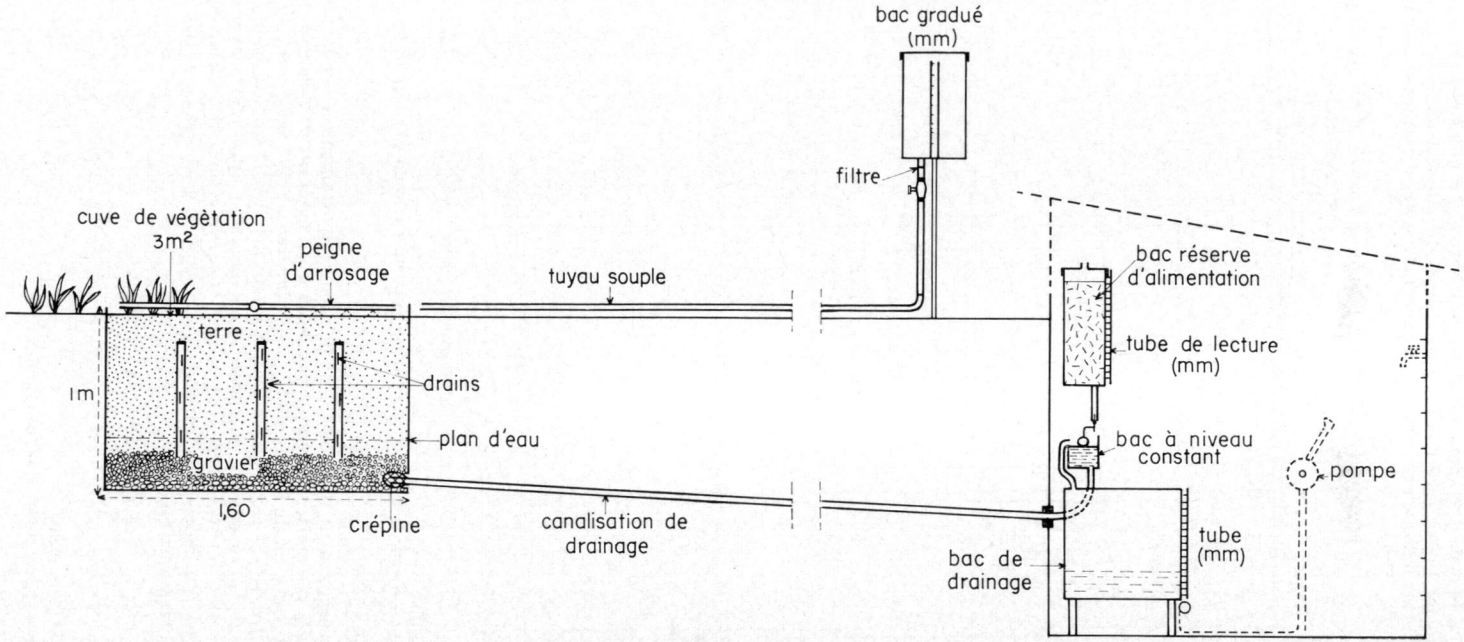


FIG. 1. — *Évapotranspiromètre*
Dispositif utilisé :
A. Schéma de l'installation.

La figure 1 montre le type d'évapotranspiromètre utilisé et les moyens d'arrosage retenus. L'arrosage des cuves de mesure se fait à l'aide d'un peigne de distribution alimenté à distance par un réservoir gradué. Cette méthode permet un apport régulier tout en évitant le piétinement au-

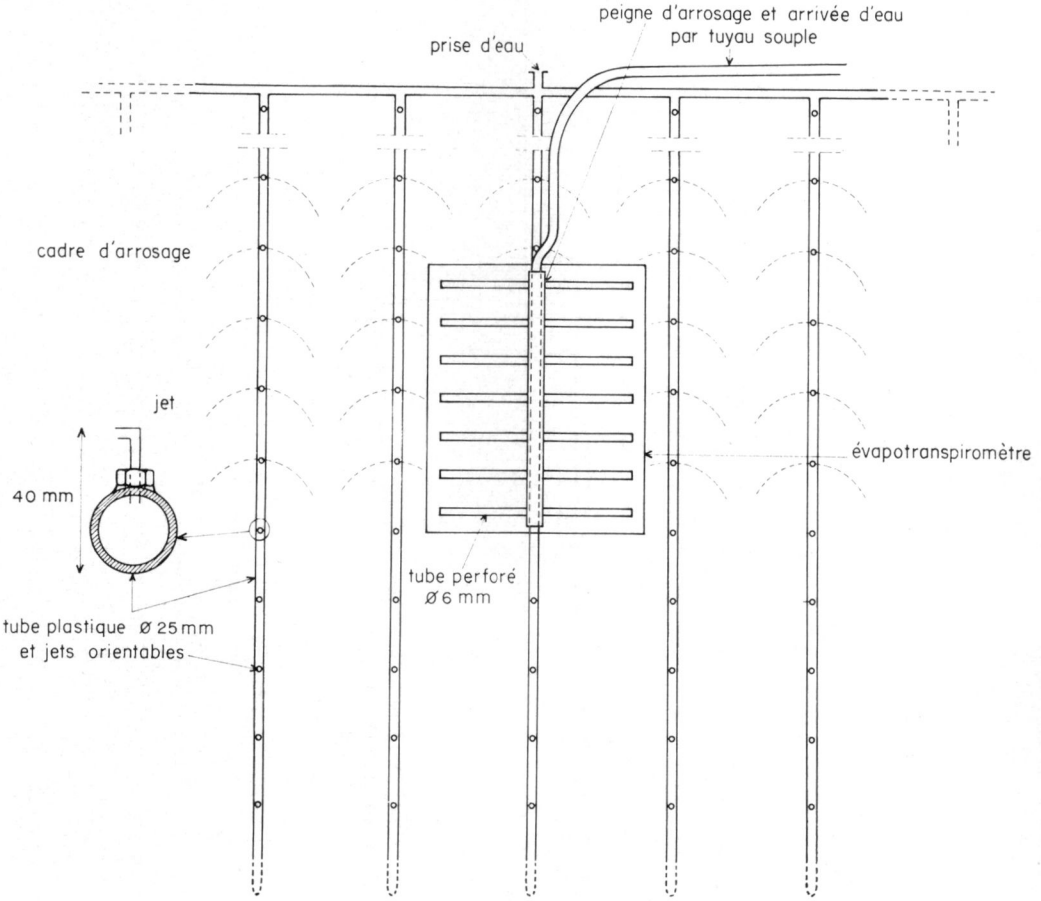


FIG. 1. — *Évapotranspiromètre*

Dispositif utilisé :
B. Détail du système d'irrigation des cuves et de leur environnement immédiat.

tour des cuves. L'environnement immédiat (120 m²) des évapotranspiromètres est arrosé sous pression grâce à des tubes en matière plastique placés sur le sol, pourvus de gicleurs orientables et à jet plan en éventail à 4-5 cm du niveau du sol, excluant tout apport accidentel sur les évapotranspiromètres. L'arrosage est contrôlé par compteur totalisateur. Enfin, le reste de l'anneau de garde est arrosé par des asperseurs classiques et les quantités apportées sont mesurées par pluviomètres totalisateurs, et éventuellement, avant et après intervention, contrôle du profil hydrique par humidimètre à neutrons (MAERTENS *et al.*, 1965). L'évapotranspiration est calculée à partir de l'équation classique suivante :

$$ET = P + A_S + A_N - D$$

P = pluie (mm),
A_S = arrosage de surface (mm),
A_N = apport par la nappe (réserve d'eau) (mm),
D = drainage (mm).

Les mesures sont journalières et les bilans décadaires. Les mesures à l'humidimètre permettent le recoupement des données précédentes grâce à l'implantation de tubes sur les anneaux de garde. Les bilans sont réalisés à partir de l'équation :

$$ET = P + A \pm \text{participation du sol}$$

P = pluie,
A = arrosage,
Sol = + dessiccation du sol entre 2 mesures,
— réhumectation du sol entre 2 mesures.

Cette méthode n'est totalement valable que pour les époques où le drainage n'est pas déclenché. Les résultats ont toujours été en bonne concordance avec les mesures sur évapotranspiromètres, avec une marge d'erreur de l'ordre de 2-3 p. 100.

Les données d'ETP sont obtenues avec la fétuque élevée variété *Manade* cultivée en gazon, maintenue à 15 cm environ par des coupes fréquentes. Le sol est maintenu près de la capacité au champ ; la fumure est basée sur la restitution des exportations.

Pour les mesures d'ETM de diverses cultures, la maintenance est similaire sauf le fait que les apports sont modulés en fonction des besoins aux différents stades physiologiques des végétaux annuels cultivés.

B. — *Mesures climatiques*

Un poste météorologique situé sur la prairie de fétuque élevée permet de mesurer divers paramètres climatiques notamment : température de l'air et du sol, pluviométrie, insolation, humidité relative, évaporation Piche sous grand abri anglais et abri simplifié (AMPS et type plastique), vitesse du vent à 1,50 m et 2 m.

C. — *Expérimentation irrigation au champ*

Parallèlement aux déterminations précédentes, diverses mesures ont été effectuées en cultures sèches et irriguées. Pour effectuer les bilans, dans le cas des plantations à écartement assez important sur la ligne (ex. : maïs), les végétaux sont placés en carré autour des tubes pour éviter le phénomène de consommation préférentielle sur la ligne par rapport à l'interligne (Courau *et al.*, 1966 ; Puech *et al.*, 1968).

Enfin, pour des secteurs éloignés des évapotranspiromètres, la détermination locale de l'ETP a été faite en tenant compte des données d'évaporation sous abri simplifié (Puech, 1967-1969).

II. — RÉSULTATS

Modalités de consommation d'eau par diverses cultures

Par rapport à l'évapotranspiration potentielle, la loi générale de variation des besoins en eau de nombreux couverts végétaux est représentée à la figure 2, en fonction des stades physiologiques et du degré de couverture du sol par la plante. Il est très utile de connaître, autour de ce schéma, le sens et l'importance des fluctuations induites par l'espèce végétale et les diverses contraintes du milieu.

a) *Évolution du rapport de consommation du maïs.*

Nous avons d'abord retenu pour cette étude le maïs (groupe III) dont le comportement est assez bien connu (Robelin, 1962 ; Cunard, 1969 ; Puech *et al.*, 1968). Les points suivants ont été abordés :

— influence des facteurs pédoclimatiques,

— influence de la participation des réserves hydriques du sol et rôle du type d'année climatique sur la consommation en culture sèche,
— influence des groupes de précocité (variétés précoces, demi-précoces, semi-tardives, tardives).

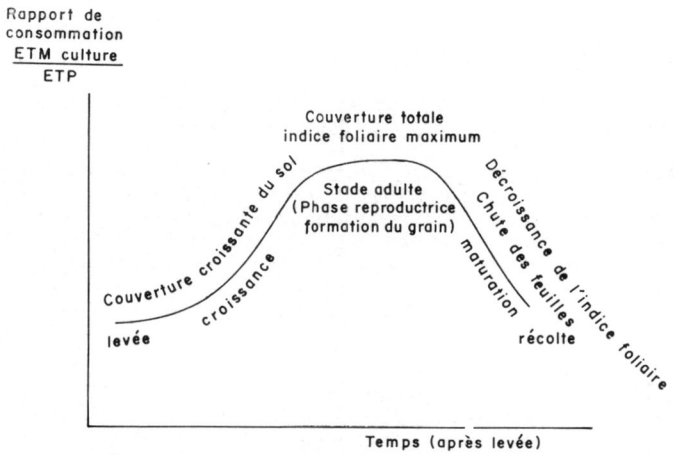


FIG. 2. — *Évolution théorique du rapport de consommation dans le temps pour une culture annuelle*

1. *Influence des facteurs pédoclimatiques.*

En 1967, l'effet du type de sol a pu être mis en évidence sous le même microclimat sur un maïs semé à la même date et à la même densité (de l'ordre de 65 000 pieds/ha). La figure 3 A indique les rapports $\frac{ETM}{ETP}$ obtenus sur sol limoneux très battant (type boulbène) et sur sol limono-argileux bien structuré. Les propriétés physiques du sol influent directement sur la vitesse de croissance du végétal (CUNARD, 1969) et par conséquent sur les besoins hydriques après un nombre de jours identiques à partir de la levée. D'autre part, les effets de sols et de microclimats entraînent aussi une variation du rapport de consommation ; la figure 3 B montre les résultats obtenus au cours de 3 années dans des secteurs différents présentant entre eux des variations d'évaporation Piche d'environ 15 p. 100 en moyenne.

2. *Influence d'une participation croissante des réserves hydriques du sol.*

Les végétaux ne peuvent s'alimenter dans le sol qu'à partir d'une réserve utile, différence entre l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. Or, la capacité de cession des sols est influencée par la profondeur et le type textural, la vitesse de dessèchement imposée et les caractéristiques de l'enracinement (HALLAIRE, 1953-1960 ; PUECH, 1969-1972). Pour des conditions climatiques données, toute participation des réserves du sol au-delà d'un certain seuil, provoque une réduction de consommation d'eau. Un essai a été réalisé sur maïs pour étudier l'effet du dessèchement du sol sur les rythmes de consommation et les répercussions sur le rendement. L'irrigation était déclenchée quand un pourcentage déterminé (20, 40, 60 p. 100) de la RU comprise dans la zone exploitée par les racines était épuisé. Un traitement (PC) période critique (encadrement de la floraison du maïs) et un témoin

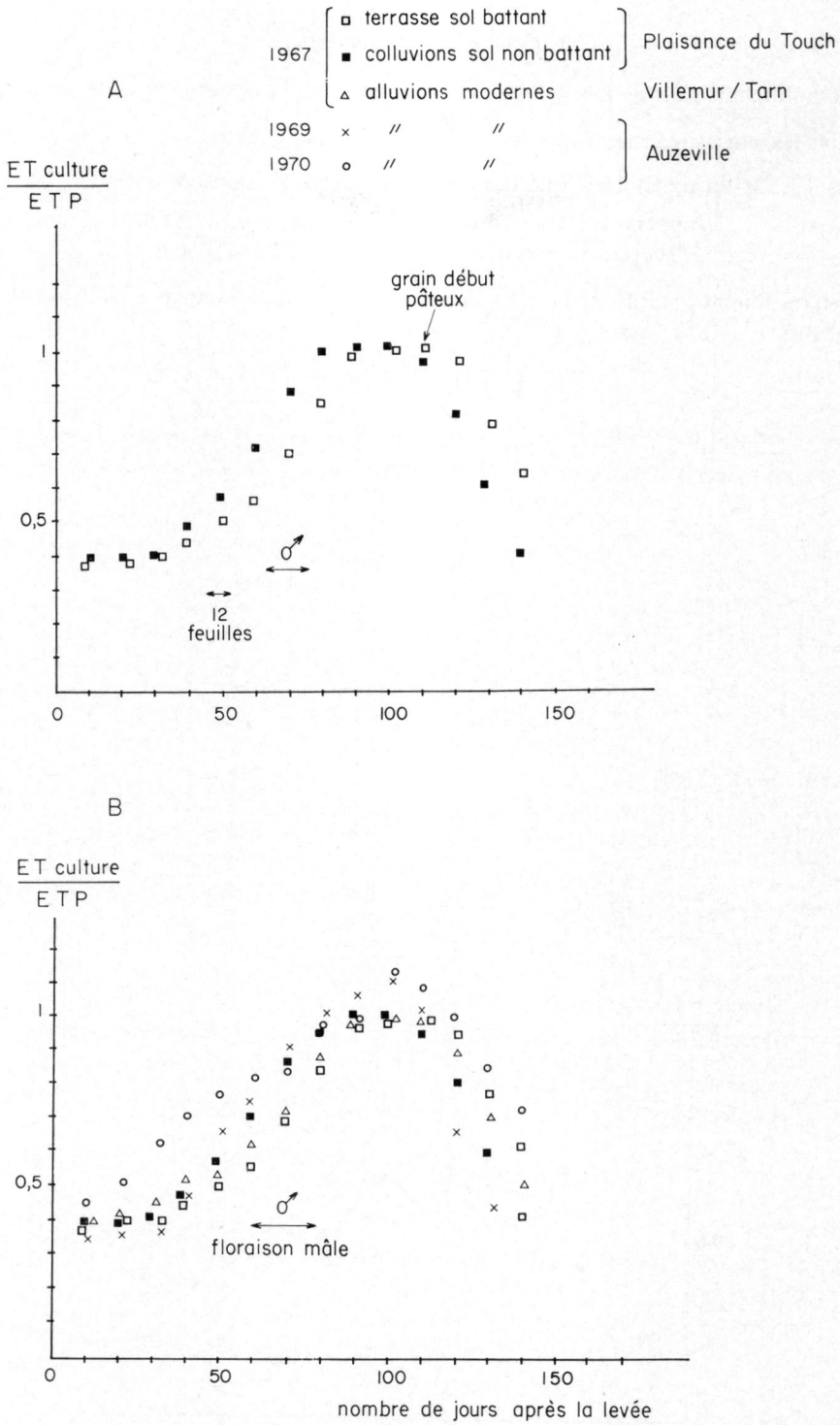


FIG. 3. — *Évolution du rapport* $\frac{ETM}{ETP}$ *d'un maïs du groupe III en fonction:*

A. Du type de sol
B. Des conditions pédoclimatiques

sec complétaient l'essai. Les bilans étaient réalisés à l'humidimètre. Le tableau I indique les variations des rapports $\frac{ETR}{ETP}$ (le traitement 20 p. 100 réalisant, cette année, l'ETM du maïs) ainsi que la valeur du rythme de consommation

$$\frac{\text{Évapotranspiration du maïs (différents essais) ETR}}{\text{Évapotranspiration maximale du maïs ETM}}$$

obtenu en tenant compte de la consommation d'eau totale pour le cycle complet de la culture.

TABLEAU I

Évolution du rapport $\frac{ET\ cultures}{ETP}$ *du maïs* (Iowa 4417) *et du rapport* $\frac{ETR}{ETM}$ *pour le cycle végétatif complet, en fonction d'une participation variable des réserves hydriques* (région toulousaine, 1967)

		Traitement				
		A	B	C	D	E
		20 p. 100	40 p. 100	60 p. 100	PC	Sec
$\frac{ETM\ culture}{ETP}$	Mai	0,39	0,35	0,35	0,35	0,35
	Juin	0,60	0,50	0,42	0,40	0,40
	Juillet	1	0,90	0,80	0,80	0,70
	Août	0,90	0,90	0,80	0,65	0,40
	Septembre (1-20)	0,50	0,35	0,40	0,30	
Rythme de consomm. maïs	$\frac{ETR}{ETM}$	1	0,92	0,82	0,69	0,54

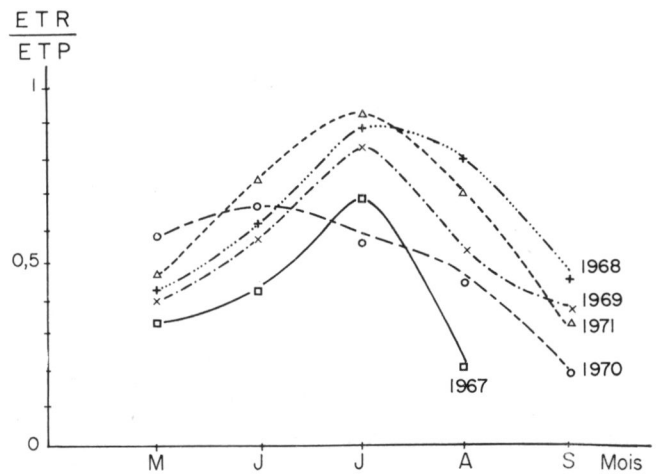


FIG. 4. — *Évolution du rapport de consommation mensuel du maïs en culture sèche, pour différentes années climatiques*

On peut constater que les résultats sont nettement influencés par les possibilités d'alimentation hydrique. L'ETP est atteinte, sauf pour le témoin non irrigué, au cours d'une période d'autant plus courte que la participation des réserves du sol a été plus importante. On conçoit donc que les rapports de consommation puissent fluctuer suivant le type d'année climatique et la fréquence d'humectation du sol par les pluies.

La figure 4 montre les résultats obtenus au cours de plusieurs années pour une culture de maïs non irriguée.

Ces résultats présentent un grand intérêt notamment quant à la valeur, pour l'ensemble du cycle végétatif, du rapport $\frac{ETR}{ETM}$ dont les répercussions sur la production végétale sont très importantes (ROBELIN, 1958). Ainsi, la figure 5 indique,

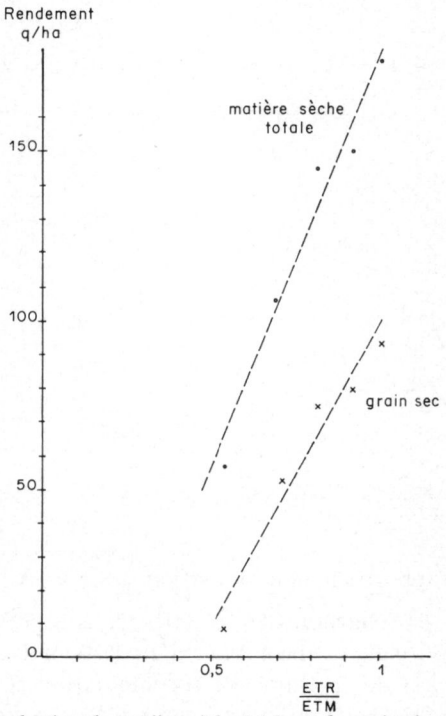


FIG. 5. — *Production de matière sèche totale et de grain du maïs* (G III) *en fonction du rapport* $\frac{ET\ culture}{ETP}$ (1967)

pour l'essai ci-dessus, les rendements obtenus en fonction de la valeur du rapport global pour la durée de la culture. Pour la matière sèche totale (tiges, feuilles, grain), l'équation de régression est :

$$\text{MST q/ha} = 249{,}8\,\frac{ETR}{ETM} - 70{,}9 \qquad \text{avec } r = 0{,}980 \text{ (HS)}.$$

Pour la production de grain à 0 p. 100 d'humidité, l'équation de régression est :

$$\text{grain q/ha} = 178{,}7\,\frac{ETR}{ETM} - 79{,}9 \qquad \text{avec } r = 0{,}963 \text{ (HS)}.$$

3. *Influence du groupe de précocité sur le rythme de consommation.*

Des maïs appartenant à 4 groupes de précocité différents ont été étudiés en 1969 et 1970. Les variétés retenues étaient :

Groupes
- I (précoce) *INRA 250*
- II (demi-précoce) *INRA 400*
- III (semi-tardif) *Dekalb 404*
- IV (tardif) *Pioneer 3567*

Les végétaux semés à la même date étaient maintenus en régime ETM. Le tableau 2 indique les résultats obtenus pour les 2 années consécutives (consommation d'eau, production, longueur du cycle végétatif).

TABLEAU 2

Production de grains de 4 variétés de maïs de précocité différente au cours de 2 années

Groupe précocité	1969			1970		
	ETM (mm)	q/ha (0 p. 100 humid.)	date maturité	ETM (mm)	q/ha (0 p. 100 humid.)	date maturité
I	450	75	20-22 sept.	514	83	6-8 sept.
II	455	89	28-30 sept.	560	94	18-20 sept.
III	475	100	8-10 oct.	580	99	26-29 sept.
IV	490	94	14-15 oct.	600	113	6-7 oct.

L'évolution des rapports de consommation $\frac{ETM}{ETP}$ pour les 2 années est donnée à la figure 6. L'allure des courbes est semblable dans tous les cas, mais il apparaît un décalage très net en valeurs absolues et dans le temps, entre les précoces et les tardifs. Les premiers ont des rythmes de consommation plus rapides en début de végétation (couverture du sol importante assez tôt) ; les derniers passent tard en régime ETM = ETP et la décroissance de leurs besoins pendant la maturation est lente (végétaux encore verts à maturité). De ce fait, les différentes variétés semées au même moment ne subissent pas, du point de vue climatique, les mêmes besoins de pointe. Pour les uns, la phase ETM = ETP se produit par exemple, courant juillet et pour les autres, après la mi-août. Par conséquent, les modalités d'irrigation sont très différentes suivant le type de variété considérée. D'autre part, on remarque que le rapport de consommation dépasse pendant 25-30 jours nettement 1 pour les variétés des groupes III et IV. Le phénomène a été vérifié tant sur évapotranspiromètres que par mesures à l'humidimètre à neutrons. De plus, si on compare les indices foliaires des groupes de précocité, III et IV par exemple, on remarque qu'ils sont voisins (de l'ordre de 4-4,5). On pourrait en première approximation attribuer

ce comportement à des effets de ventilation vu le très fort développement en hauteur de ces plantes (> 3 m) comparativement aux groupes I et II et surtout à la fétuque. Ces observations ne sont pas isolées et nous verrons ci-dessous que le phénomène semble exister avec plus d'ampleur encore chez des oléagineux (ROBELIN, 1964 ; REGNAULT, ROLLIER, 1971 ; ROLLIER, 1971 ; PUECH *et al.*, 1971).

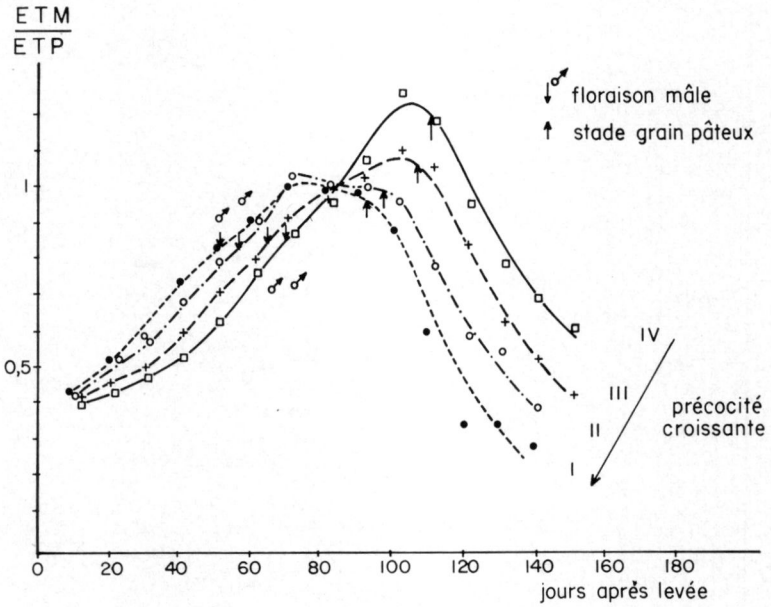


FIG. 6. — *Rythme d'évapotranspiration dans le temps de maïs appartenant à 4 groupes de précocité* (moyenne 1969-1970)

Néanmoins, les résultats rapportés jusqu'ici montrent que la notion d'évapotranspiration est essentielle dans l'étude des relations sol-plante-climat. Elle permet de ramener à un dénominateur commun l'influence des différents paramètres de l'alimentation en eau et d'expliciter de ce fait leur influence sur la production. Ainsi, dans le cas du maïs, les résultats expérimentaux obtenus entre 1965 et 1970 montrent (fig. 7) que la potentialité de la variété peut être atteinte régulièrement, lorsque le rythme de consommation $\frac{ETR}{ETM}$ est voisin de 1. Pour la production de grains (maïs groupe III), en fonction du rythme de consommation, l'équation de régression est, pour 6 années et 4 situations géographiques différentes en Haute-Garonne :

$$\text{Grain (0 p. 100 Hté) q/ha} = 150{,}8\,\frac{ETR}{ETM} - 57{,}2 \text{ avec } r = 0{,}934$$

Enfin, on peut remarquer sur le même graphique la potentialité de production supérieure pour les maïs tardifs du groupe IV, à cycle végétatif long.

D'autre part, ce même type de résultat général se retrouve aussi sur sorgho (*INRA 450*), comme le montrent les données obtenues au cours de 3 années :

$$\text{Grain sec q/ha} = 88{,}3\,\frac{ETR}{ETM} - 17{,}9 \qquad \text{avec } r = 0{,}977 \text{ HS.}$$

Il apparaît donc une potentialité de production en irrigué moindre que pour le maïs mais une meilleure réponse en situation« sèche ».

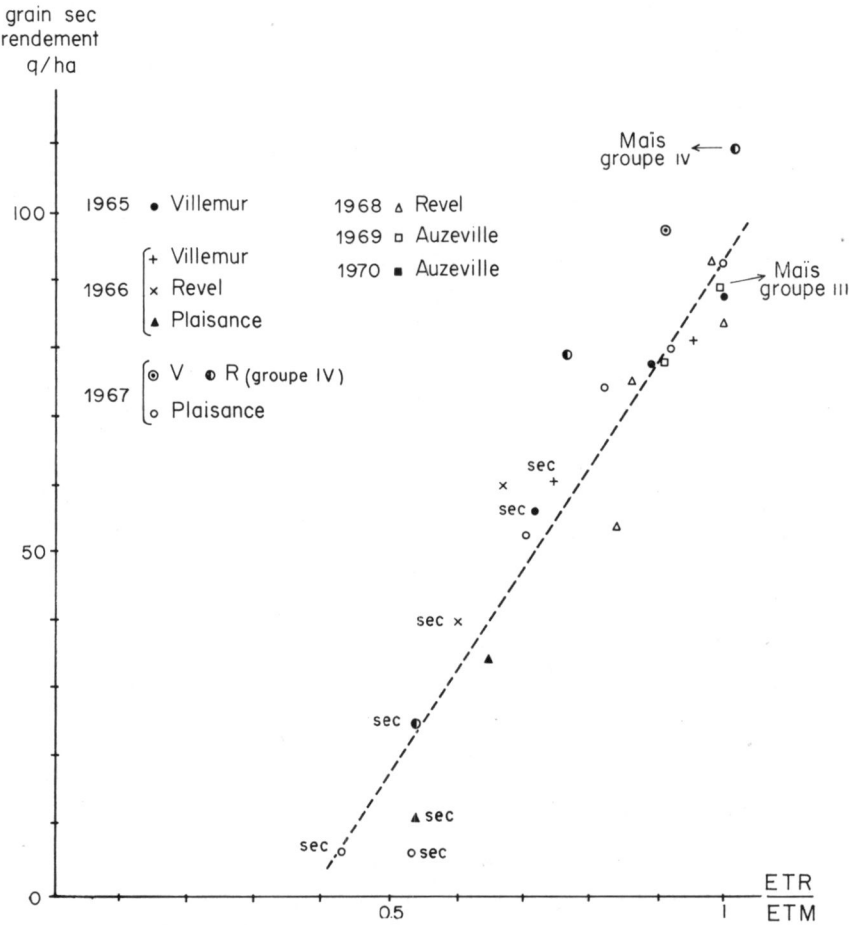


FIG. 7. — *Production de grain au cours de différentes années et dans divers secteurs, en fonction du rapport de consommation*
(cultures sèches et irriguées, Maïs groupe III et IV)

b) *Observations sur l'évapotranspiration de quelques végétaux.*

1. *Comportement des tournesols, sojas, sorghos, fétuques.*

Comme nous venons de le voir, les rapports de consommation ont une très grande importance pour le raisonnement des modalités d'irrigation suivant les espèces et les contraintes du milieu. De plus, la production végétale dépend directement de leur valeur globale sur le cycle végétatif. Si de nombreuses cultures vérifient en général les lois $\frac{ETM}{ETP}$ décrites : blé, orge, betterave, maïs, sorgho, etc. (ROBELIN, 1962, 1969 ; PUECH *et al.*, 1968 ; ROBELIN, MINGEAU, 1971), il était important de contrôler le comportement d'autres espèces. Aussi, avons-nous comparé à partir de

1971, les ETM de deux oléagineux : le tournesol (*Helianthus annuus* L.) et le soja (soja *Max* L.) à celles du maïs et du sorgho de comportements déjà connus (PUECH *et al.*, 1968 ; LANGLET, 1971) ; la fétuque élevée servait de référence ETP.

Le tournesol, hybride simple variété *INRA 6501*, est un végétal à feuilles larges et gaufrées, assez homogène, à floraison régulière et de courte durée. Le peuplement de référence en irrigué a été de 80 000 pieds/ha. Le soja variété *Amsoy*, inoculé avant semis a été semé à 400 000 pieds/ha. Enfin, le sorgho variété *INRA 450* a été semé à 350 000 pieds/ha. Les écartements sur toutes les cultures étaient de 55 cm. Par ailleurs, il y avait sur les oléagineux deux témoins secs et sur le tournesol seulement une intervention quand 50 p. 100 de la réserve utile contenue dans la zone exploitée par les racines étaient utilisées.

La figure 8 montre les résultats $\frac{ETM}{ETP}$ obtenus pour la même année climatique. L'évapotranspiration potentielle moyenne journalière pour les mois de juillet, août et septembre 1971 a été respectivement de 4,9 mm, 4,3 mm et 3,3 mm, ce qui, pour la région toulousaine, représente une évapotranspiration peu élevée. Comme cela avait été déjà noté (PUECH *et al.*, 1968), la variété de sorgho utilisée présente un comportement de type classique, avec une période ETM = ETP et un indice foliaire maximum de l'ordre de 5. Par contre, les deux oléagineux s'ils suivent le sens général d'évolution du rapport $\frac{ETM}{ETP}$ obtenu sur diverses cultures passant par différents

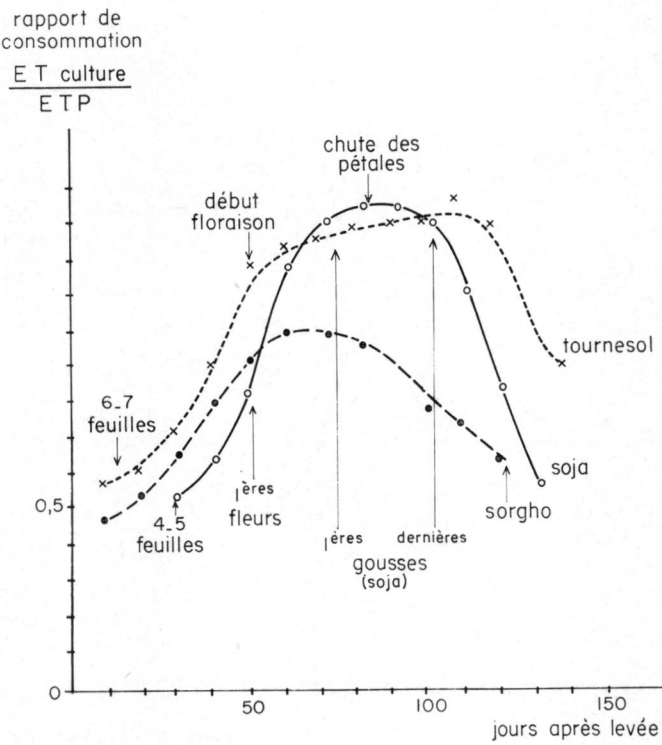


FIG. 8. — *Comparaison des rythmes de consommation du tournesol, du soja et du sorgho* (1971)

stades physiologiques, s'en distinguent très nettement par les valeurs élevées atteintes. La consommation d'eau dépasse en effet l'ETP, habituellement mesurée sur fétuque, avec des résultats concordants obtenus à la sonde à neutrons et sur évapotranspiromètres. Le rythme d'évapotranspiration de la fétuque ne peut être en cause, d'une part, parce que la demande a été faible en 1971 et d'autre part, parce que ce végétal est susceptible de réaliser des consommations d'eau très importantes comme le montre le tableau 3 pour les mois de juillet de 1967 à 1972. Par ailleurs, la confrontation avec les données climatiques, d'évaporation notamment, ne permet pas de relever une anomalie.

TABLEAU 3

Évapotranspiration journalière moyenne réalisée en juillet par la fétuque élevée var. Manade *au cours de 6 années*

Année	1967	1968	1969	1970	1971	1972
ETP (mm/j)	8,2	5,4	6,1	5,8	4,9	5,1

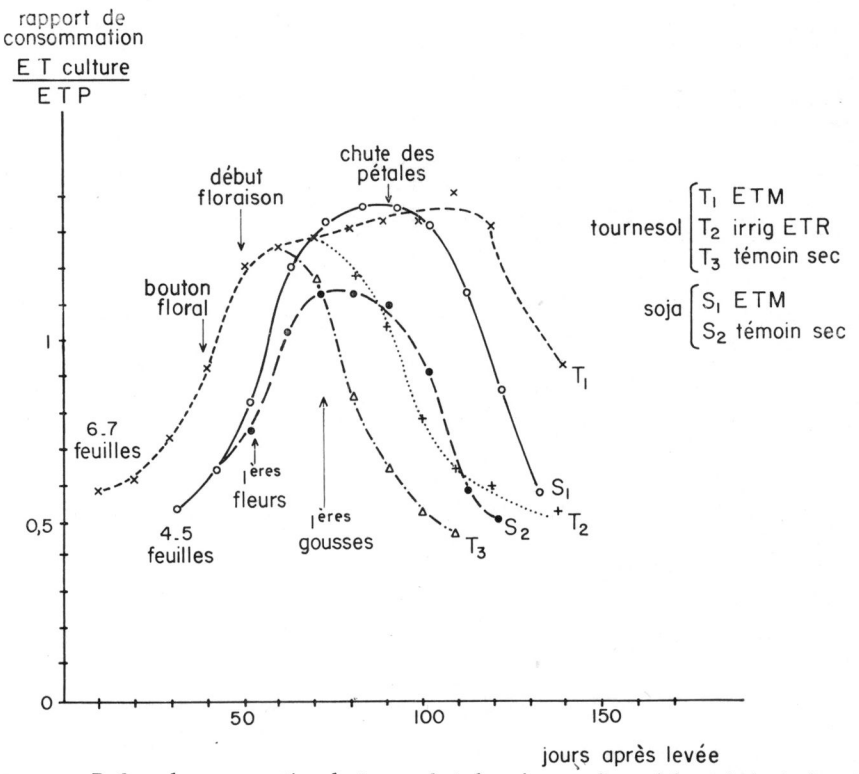


FIG. 9. — *Rythme de consommation du tournesol et du soja en culture sèche et irriguée* (1971)

Par conséquent, pour le tournesol, le rapport de consommation d'abord peu élevé en début de végétation, dépasse 1 de la floraison jusqu'à la maturation ; pendant cette période, l'indice foliaire passe par son maximum, la fécondation a lieu ainsi que la lipidogenèse dans les akènes. Pour le soja, le rapport devient supérieur à 1 pendant l'élaboration des gousses et la formation des graines. Le même type de phénomène se retrouve avec les autres traitements secs et irrigués comme le montre la figure 9 où sont également portés les divers stades physiologiques. Enfin signalons que les mêmes résultats ont été retrouvés sur ces cultures en 1972.

2. *Remarques sur le comportement de 2 oléagineux.*

On pourrait penser que certains phénomènes ont perturbé l'évapotranspiration des 2 cultures, notamment les effets advectifs ; or, ces végétaux ne sont pas très hauts (environ 1,60 m pour le tournesol et 1,20 m pour le soja en culture irriguée). D'autre part, l'année 1971 a été assez peu ventée comme le montrent au tableau 4, les vitesses moyennes mensuelles du vent à 1,50 et 2 m sur prairie.

TABLEAU 4

Vitesse moyenne du vent (m/s) en 1971 sur prairie, à 1,50 m et 2 m

	Mois					
	A	M	J	J	A	S
	Vitesse (m/s)					
1,50 m	3	2,6	2	1,6	1,7	1,8
2 m	3,3	2,8	2,2	1,7	1,8	1,9

De plus, les mesures de consommation ont lieu au sein même d'une parcelle expérimentale de grande dimension et il existe de plus un net effet de réduction de la vitesse du vent à l'intérieur de la culture (ECKARDT *et al.*, 1971). Enfin, on peut remarquer que les oléagineux étudiés sont situés au milieu d'un vaste dispositif expérimental irrigué et ne sont pas exposés à un effet oasis, auquel serait d'ailleurs soumise la parcelle ETP fétuque contiguë.

La surconsommation par rapport à l'ETP fétuque pourrait être attribuable à des variations d'albedo, mais bien que nous nous proposons de déterminer ultérieurement cette caractéristique, il ne semble pas que ce soit l'unique hypothèse à retenir. Enfin, le phénomène pourrait être en relation avec la présence du plan d'eau dans les évapotranspiromètres, or l'ETP a été aussi dépassée plus ou moins longtemps en culture irriguée et par les deux témoins secs.

Vue son importance, la surconsommation d'eau ne semblerait pas liée à des phénomènes dus au milieu (climat, advection, disponibilité de l'eau) mais plutôt à des caractères physiologiques, avant et au cours de la lipidogenèse.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude de l'évapotranspiration de différentes cultures, au cours de plusieurs années, dans diverses conditions de milieu, a permis de mettre en évidence le comportement spécifique des végétaux vis-à-vis de l'évapotranspiration potentielle. Il apparaît globalement deux types de résultats que nous discuterons ci-dessous : les uns de portée pratique, les autres de portée plus théorique.

Il ressort que l'évolution dans le temps du rapport de consommation

$$\frac{\text{évapotranspiration de la culture}}{\text{ETP}}$$

pouvait être influencée d'une part, par des facteurs propres au milieu : propriétés physiques des sols, importance de la participation des réserves hydriques, conditions pédoclimatiques et d'autre part, par des facteurs inhérents aux espèces (caractéristiques variétales, groupes de précocité). La connaissance de ces données s'avère capitale pour la conduite rationnelle des irrigations. Celles-ci peuvent alors être guidées avec efficacité à partir d'avertissements plus élaborés, envisageant le comportement des cultures en tenant compte des contraintes du milieu. Enfin, ce type de données permet d'envisager l'étude de l'évolution des stocks d'eau au niveau des systèmes de cultures et son extension à diverses échelles géographiques.

Par ailleurs, les résultats obtenus montrent l'importance de la réalisation d'un rythme de consommation $\frac{\text{ETR}}{\text{ETM}}$ généralement voisin de l'unité pour l'obtention d'une production maximale (matière sèche, grain). Du point de vue économique, cela sous-entend une participation maximale des réserves hydriques, notamment en fin de culture, en raisonnant la dernière intervention d'irrigation. Cette analyse qui doit s'appuyer sur le volant des réserves disponibles et l'estimation des contraintes climatiques probables, nécessite impérativement la connaissance des rapports de consommation dans le temps ainsi que la nature et la durée des périodes critiques du végétal considéré.

Dans un autre domaine, certains résultats obtenus posent de nouveaux problèmes sur le plan théorique et physiologique. En effet, durant leur phase de pleine végétation, certaines cultures étudiées ici, notamment les maïs tardifs, le tournesol, le soja, présentent des consommations d'eau qui dépassent nettement l'évapotranspiration potentielle, mesurée habituellement sous nos climats sur fétuque élevée *Manade*. Ces données posent donc le problème des modalités de consommation d'eau par ces végétaux mais également celui de la définition de la référence ETP. Dans ces conditions, la notion d'ETP perd un peu de sa consistance au niveau biologique mais la garde au niveau physique. Il reste à savoir si la fluctuation $\frac{\text{ETM}}{\text{ETP}}$ physique est sous la dépendance de variations de paramètres physiques ou de paramètres biologiques au sens strict. On pourrait par exemple envisager des facteurs « résistance variable » sous dépendance biologique et dans certains cas, des effets de surface. Ces données amènent à entreprendre une étude plus approfondie de ces pro-

blèmes pour tenter de définir l'importance des aspects physiologiques propres aux divers végétaux par rapport aux aspects d'ordre climatique.

Reçu pour publication en février 1973.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement M. ROBELIN de la Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand qui a bien voulu nous faire part de ses conseils pour la rédaction de cet article.

SUMMARY

COMPARED EVAPOTRANSPIRATION OF VARIOUS CROPS AND STUDY OF WATER-CONSUMPTION RATES

Maximum and actual evapotranspiration (respectively abbreviated to ETM and ETR) of various crops (maize, sorghum, sunflower, soja, fescue) have been compared and measured using both evapotranspirometers and the neutron method. The water-consumption conditions of these crops in terms of climatic constraints (measured potential evapotranspiration of reed fescue) was investigated, this enabling to watch over (more particularly with maize) development of the $\frac{ETM}{ETR}$ ratio in terms of the varieties of plants, soils, pedoclimatic factors and, also, the increasing contribution of the water reserves in the plants. The data so derived showed that the law of linear variation of the yield in terms of the $\frac{ETR}{ETM}$ ratio was consistent. Finally, it appeared that, in some late-maturing plats, (e. g., maize, sunflower, soja), the ETP, as usually measured with reed fescue was, over a given period of their growth, definitely exceeded, this giving rise to new problems as to the currently-available information on plants farmed on a large scale.

ZUSAMMENFASSUNG

VERGLEICH DER DUNSTAUSSCHWITZUNG VERSCHIEDENER KULTUREN UND UNTERSUCHUNG EINIGER FAKTOREN, DIE DIE VERBRAUCHSRYTHMEN BEEINFLUSSEN

Die (maximalen MDA und tatsächlichen TDA) Dunstausschwitzungen verschiedener Kultren (Mais, Sorgho, Sonnenblume, Sojabohne, Schwingel) wurden anhand von Massen mit Verdunstungsmessern und der neutronischen Methode miteinander verglichen. Die Wasserverbrauchsart dieser Kulturen in Anbetracht der klimatischen Einschränkungen (potentielle Dunstausschwitzung PDA gemessen an hohen Schwingeln) wurden untersucht. Daher war es möglich besonders beim Mais die Evolution des Verhältnisses $\frac{MDA}{PDA}$, in Anbetracht der Pflanzensorten, der Böden, der bodenklimatischen Faktoren und einer zunehmenden Beteiligeng der Wasservorräte zu verfolgen. Die erzleiten Angaben ermöglichten, das linear Variationsgesetz des Ertrags im Verhältnis $\frac{MDA}{TDA}$ zu kontrollienre. Abschliessend wurde festgestellt, dass einige

Pflanzen (Spät-Maïs, Sonnenblumen, Sojabhonen) imstande waren, im Laufe ihres Wachstumszyklus, den beim hohen Schwingel gewöhnlich gemessenen PDA deutlich zu überschreiten, was neue Probleme auf Ebene der Kenntniss über die Pflanzen der Grosskulturen stellt.

РЕЗЮМЕ

Сравнительное изучение эвапотранспирации разных культур и некоторых факторов влияющих на ритмы потребления влаги.

Ж. ПЮЕШ, М. ХЕРНАНДЕЗ.

Проведено сравнительное изучéние эвапотранспирации (максимальной ETM и реальной ETR) разных культур (кукуруза, сорго, подсолнечник, соя, овсяница), измеренной при помощи эвапотранспирометров или нейтронного метода, и потребления влаги этими культурами, в зависимости от климатических условий (потенциальная эвапотранспирация овсяницы). Явилась таким образом возможность проследить, в частности у кукурузы эволюцию соотношения $\frac{ETM}{ETP}$ в зависимости от : сортов, почв, педологических и климатических факторов, и увеличивающегося участия водных резервов.

Полученные данные позволили проверить закон линейного изменения урожайности в зависимости от соотношения $\frac{ETR}{ETM}$. И, наконец, выяснилось что потенциальная эвапотранспирация некоторых растений (поздняя кукуруза, подсолнечник, соя) может намного превзойти в течении одной из фаз их вегетативного цикла потенциальную эвапотранспирацию обычно найденную для овсяницы, что ставит новые задачи на уровне познания наиболее распространенных культурных растений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLANCHET R., MARTY J.-R., PUECH J., MAERTENS C., 1971. Importance de quelques facteurs techniques pour l'étude de l'intérêt économique de l'irrigation du maïs. *Bull. tech. Inform.*, **264**, 921-934.

BOUCHET R.-J., ROBELIN M., 1969. Évapotranspiration potentielle et réelle. Domaine d'utilisation. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 215-223.

BURGEVIN H., HÉNIN S., 1943. Influence de la profondeur du plan d'eau sur le développement des plantes. *Ann. agron.*, **19**, 288-394.

COURAU M., PUECH J., FIORAMONTI S., MAERTENS C., 1966. Observations sur la consommation de l'eau et la production du maïs en culture sèche et irriguée. *Bull. Ass. fr. Ét. Sol*, 44-59.

CUNARD A., 1969. *Influence de l'alimentation hydrique sur la croissance et le développement du maïs.* Thèse, Toulouse.

ECKARDT F., HEIM G., METHY M., SAUGIER M., SAUVEZON R., 1971. Fonctionnement d'un écosystème au niveau de la production primaire. Mesures effectuées dans une culture d'*Helianthus annuus*. *Œcol. Plant.*, **6**, 51-100.

FIORAMONTI S., MARTY J.-R., COURAU M., PUECH J., 1967. Conduite et résultats de cultures expérimentales de maïs irrigué dans 3 sols différents. *C. R. Acad. Agric.*, **11**, 53-65.

GODARD M., 1959. L'approvisionnement en eau du sol, les facteurs climatiques et la végétation du maïs dans le Languedoc méditerranéen. *Ann. agron.*, **12**, 127-134.

GOELLNER A., 1969. Les avertissements en irrigation dans la région du Bas Rhône-Languedoc. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 257-266.

LANGLET A., ALDHUY A., 1971. Observations sur les composantes du rendement en grains du sorgho. *C. R. Acad. Agric.*, **18**, 1606-1616.

MARTY J.-R., PUECH J., 1971. Efficience de l'eau en production fourragère. *C. R. Acad. Agric.*, 938-949.

MAERTENS C., MORIZET J., STUDER R., 1965. Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons. *Ann. agron.*, **16**, 5-23.

PUECH J., MAERTENS C., FIORAMONTI S., MARTY J.-R., COURAU M., 1968. Comparaison des consommations d'eau et des productions de matière sèche de quelques cultures irriguées. *Ann. agron.*, **19** (3), 365-377.

PUECH J., COMBRET M., 1969. Contraintes du milieu et besoins en eau des cultures. Application à des avertissements irrigation. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 231-237.

PUECH J., MAERTENS C., MARTY J.-R., 1969. Modalités de dessèchement du sol sous des cultures plantées en lignes espacées. *Ann. agron.*, **20**, 597-607.

PUECH J., HERNANDEZ M., 1972. *Évapotranspiration et application aux systèmes de cultures.* A. F. E. E., rue de Madrid, Paris. 16 p.

REGNAULT Y., ROLLIER M., 1971. *Le soja. Études techniques*, 1966-1970. Centre tech. interprof. Oléag. métropol., 188 p.

ROBELIN M., COLLIER D., 1958. Évapotranspiration et rendements culturaux. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1774-1776.

ROBELIN M., 1962. Évapotranspiration réelle de différents couverts végétaux bien alimentés en eau et évapotranspiration potentielle. Détermination expérimentale. *Ann. agron.*, **13**, 493-522.

ROBELIN M., 1964. Comptes rendus des travaux. Station d'Agronomie de Clermont-Ferrand.

ROBELIN M., 1967. Action et arrière-action de la sécheresse sur la croissance et la production du tournesol. *Ann. agron.*, **18** (6), 579-599.

ROBELIN M., 1969. Assistance à l'irrigation dans le Val d'Allier. *Bull. tech. Inform.*, **238**, 227-229.

ROBELIN M., MINGEAU, 1970. Alimentation en eau et croissance de la betterave. *I. I. R. B.*, 71-86.

ROLLIER M., GUILHAUMAUD Y., 1970. Rapport protéines du tournesol. *Action concertée* nº 67-007-49.

ROLLIER M., 1970. Besoins en eau du tournesol. *Centre tech. interprof. Oléag. métropol.*, note 47, 9 p.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 457-464.

L'ACCUMULATION SÉLECTIVE DU MAGNÉSIUM DANS LES SOLS : MÉCANISME ET INFLUENCE SUR LA CROISSANCE ET LA NUTRITION DU RAY-GRASS D'ITALIE

F. MOUGENOT et A. GALLEZ

Institut agronomique Hassan II,
Rabat (Maroc)

RÉSUMÉ

L'influence de la proportion de magnésium des ions échangeables (de 20 à 95 p. 100) sur l'absorption par le ray-grass du phosphore, du potassium, du calcium et du magnésium a été étudiée. Les effets dépressifs d'une proportion trop importante de Mg sont nets mais ne se manifestent que lorsque cette fraction dépasse 90 p. 100. Un effet dépressif sur le rendement en matière sèche de la plante se constate toutefois pour des fractions moins importantes. Une étude des processus d'échange Ca-Mg sur le sol utilisé pour les essais d'absorption des ions par le ray-grass a montré que, dans le cas d'une précipitation différentielle des carbonates de Ca et de Mg, de très hautes valeurs de la proportion de Mg^{++} dans le complexe pouvaient être atteintes.

INTRODUCTION

L'incidence des rapports de certains éléments nutritifs sur la croissance des végétaux est bien connue. Le cas du rapport Ca/Mg revêt une importance particulière dans les sols méditerranéens. En effet, dans ces régions vouées en bonne partie à l'agriculture irriguée, les sols et les eaux se révèlent souvent riches en calcium, magnésium et carbonates et, en raison de leur climat chaud et sec, les phénomènes d'évaporation atteignent une intensité considérable.

Une des conséquences de cet état de choses peut être l'accumulation sélective du magnésium sur le complexe d'échange du sol, phénomène qui entraîne fatalement un déséquilibre au niveau de l'absorption des éléments nutritifs par la plante.

L'objet du présent article est d'étudier les effets de l'accumulation magnésienne sur la croissance d'une plante, une fois vérifié le bien-fondé des hypothèses

faites sur le mécanisme de cette accumulation. Nous avons donc procédé à quelques déterminations physico-chimiques, puis nous avons fait croître du Ray-Grass sur des échantillons de terre préalablement saturés en calcium et magnésium à divers rapports Ca/Mg et nous avons étudié les variations du rendement et de l'assimilation des éléments nutritifs par cette plante.

Le système sol-plante peut être représenté, outre la plante, par quatre phases chimiques distinctes : l'atmosphère et la solution du sol, le complexe d'échange et les précipités. Toutes ces phases sont liées par des équilibres chimiques (fig. 1) qui sont, principalement, la dissolution de l'anhydride carbonique (K_0), la première et la seconde dissociation de l'acide carbonique (K_1 et K_2), la solubilité des carbonates de calcium et de magnésium (K_s et K'_s) et l'échange ionique Ca → Mg (K_z).

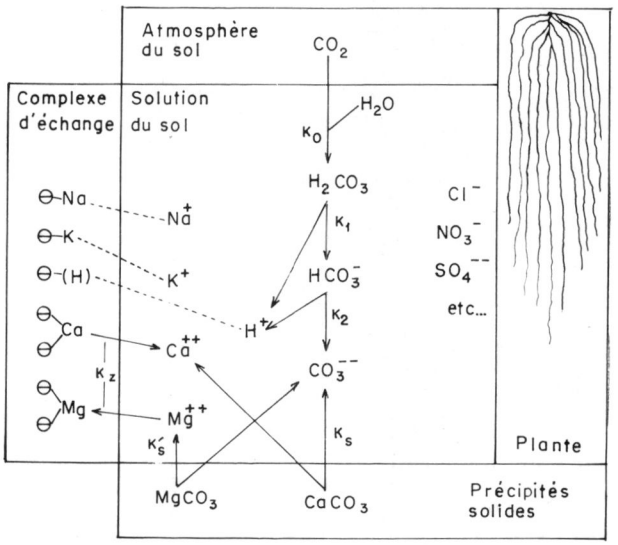


FIG. 1. — *Les équilibres physico-chimiques dans le sol*

A l'exception de K'_s et de K_z, les constantes thermodynamiques de ces équilibres sont connues (à 25°C, $K_0 = 10^{-1,5}$, $K_1 = 10^{-6,4}$, $K_2 = 10^{-10,3}$ et K_s (calcite) $= 10^{-8,3}$). On sait cependant que la solubilité du $MgCO_3$ est nettement plus élevée que celle du $CaCO_3$ (les tables de constantes chimiques donnent des valeurs de K'_s comprises entre 10^{-4} et $10^{-7,5}$) et que l'affinité du complexe d'échange est à peu près la même pour Ca et Mg ($K_z = 1$), alors que, comparée à cette dernière, l'affinité pour les monovalents Na et K est très faible.

A partir de là, nous pouvons proposer deux causes possibles d'accumulation magnésienne. La première est la présence de carbonate de magnésium dans le sol. Lorsque de l'eau pénètre dans un tel sol (irrigation ou remontée de nappe), une certaine quantité de magnésium est mise en solution, en même temps que du calcium précipite. Le rapport Ca/Mg peut ainsi descendre jusqu'à une valeur minimale qui est fixée par $a_{Ca}/a_{Mg} = K_s/K_s$ puisque $K_s = a_{Ca} \cdot a_{CO}$ et $K'_s = a_{Mg} \cdot a_{CO_3}$. Le rapport Ca/Mg sur le complexe d'échange peut atteindre un minimum donné par la relation $\bar{a}_{Ca}/\bar{a}_{Mg} = K_s/(K_z \cdot K'_s)$ puisque $K_z = (\bar{a}_{Mg} \cdot a_{Ca})/\bar{a}_{Ca} \cdot a_{Mg})$ où les

a représentent les activités en solution et les $\bar{a}$, les activités des cations adsorbés. Sachant que $K_z = 1$ et que $K'_s \gg K_s$, il apparaît donc que ce rapport peut prendre des valeurs extrêmement faibles.

Une autre cause d'accumulation magnésienne mise en évidence au Maroc (LEPOUTRE et SAUVAGEOT, 1969) est liée à l'évaporation de la solution du sol. Durant l'évaporation, du CO_2 est libéré par suite de la réaction $HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3$, mais cette réaction qui entraîne une hausse du pH est compensée par la dissociation d'une certaine fraction de bicarbonate.

La combinaison de ces réactions inverses donne l'équation chimique bien connue :

$$2\ HCO_3^- \leftrightarrow CO_3^{--} + CO_2^{\uparrow} + H_2O$$

dont la constante thermodynamique à 25°C est $K_2/(K_0 \cdot K_2) = 10^{-2,4}$. A partir de là, le mécanisme est le même que dans le premier cas. La production de carbonate provoque la formation de précipités et tant que le rapport Ca/Mg minimum n'est pas atteint, le calcium précipite seul, tandis que le magnésium s'accumule sur le colloïde.

Les seules données qui nous manquent pour appuyer ces hypothèses sont donc K'_s et K_z. C'est pourquoi, avant de faire les essais en vase de végétation, nous avons préalablement déterminé ces deux constantes d'équilibre.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES ET MATÉRIEL UTILISÉ

Pour déterminer K'_s, nous avons utilisé du $MgCO_3$ synthétisé au laboratoire en mélangeant deux solutions de $MgCl_2$ et de Na_2CO_3, puis en filtrant et en séchant le précipité ainsi obtenu. Le produit de solubilité a été calculé au moyen des équations d'équilibre et des constantes thermodynamiques, après une mesure du pH du système eau distillée-carbonate de magnésium dans un récipient ouvert à l'atmosphère et laissé au repos (GARRELS et CHRIST, 1965).

Pour la détermination de K_z et les essais en pots, nous avons utilisé un même échantillon de « tirs » (vertisol) provenant de la plaine du Gharb au Maroc (Ferme d'application de l'Institut agronomique Hassan II près de Moghrane). La CEC de cet échantillon a été mesurée, après saturation en Ca, par dilution isotopique du ^{45}Ca et la teneur en calcaire au moyen d'un calcimètre volumétrique. L'isotherme d'échange Ca → Mg a été déterminé par la méthode de dialyse d'équilibre et K_z a été calculé au moyen de l'équation de GAINES et THOMAS (1963).

Pour les essais en pots, le complexe d'échange du sol a été saturé en calcium et en magnésium seulement et selon quatre rapports Ca/Mg : 80/20, 50/50, 20/80, 5/95.

TABLEAU I

	mg/10 l
Fe(EDTA)	35
$MnCl_2$, 4 H_2O	10
H_3BO_3	15
$ZnSO_4$, 7 H_2O	1,25
$CuSO_4$, 5 H_2O	1,25
$(NH_4)_6O_7Mo_{24}$	0,125
$(NH_4)_2SO_4$	300
KH_2PO_4	219,5
KCl	19,102
$NaNO_3$	81,5

A cet effet, des solutions de 500 méq/l chacune et présentant les mêmes rapports de ces deux ions ont été préparées et marquées au ^{45}Ca. La saturation du complexe a été réalisée en faisant percoler ces solutions dans quatre échantillons de terre de 500 g chacun, jusqu'à ce que l'activité de l'effluent soit égale à celle de la solution utilisée. Les sels solubles ont été lessivés à l'eau distillée jusqu'à disparition de l'activité dans l'effluent.

Les échantillons ainsi préparés ont été séchés à l'air, dilués dans quatre fois leur poids de sable et scindés en deux sous-échantillons ; ceux-ci ont été mis en pots et ensemencés avec du Ray-Grass d'Italie. Pendant 45 jours, chaque pot a reçu 25 ml par jour d'une solution nutritive marquée au ^{32}P (tabl. 1). La concentration totale de cette solution étant inférieure à 1 méq/l et les cations dominants étant tous monovalents, ce processus expérimental n'a pas pu modifier de façon appréciable la composition du complexe d'échange.

En fin d'expérience, les parties aériennes des plantes ont été récoltées en une seule coupe, pesées, minéralisées au moyen de HNO_3 et $HClO_4$, puis analysées (dosage de P, K, Ca et Mg et comptage de ^{32}P et ^{45}Ca). Pour éviter les interférences du ^{32}P sur le ^{45}Ca, nous avons tiré parti de la courte période du ^{32}P en laissant reposer les échantillons pendant deux mois avant de procéder aux comptages. Nous avons calculé l'activité de Ca de la façon suivante : soit ε l'erreur commise dans le comptage du ^{45}Ca due à l'interférence du ^{32}P; on a, pour deux comptages N_0 et N_t effectués aux temps o et t :

$$N_0 = N_{Ca} + \varepsilon$$
$$N_t = N_{Ca} \cdot \exp(-\lambda_{Ca} \cdot t) + \varepsilon \cdot \exp(-\lambda_p \cdot t)$$

où λ_{Ca} et λ_p sont les constantes de désintégration des deux radioisotopes de demi-vie 165 et 14,3 jours. Ces deux équations rendent possible le calcul de l'activité N_{Ca}.

Lors de ces expériences, le dosage du phosphore a été fait par colorimétrie (Beckman), ceux du potassium, du calcium et du magnésium par spectrophotométrie d'absorption atomique (Zeiss et Perkin-Elmer) et les comptages de radioactivité par scintillation liquide (Tracerlab et Packard).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les déterminations physico-chimiques ont donné les résultats auxquels on pouvait s'attendre. Le produit de solubilité du carbonate de magnésium ($K'_s = 10^{-6,2}$ à 25°C) est cent fois plus élevé que celui de la calcite ; quant à la sélectivité du sol utilisé, elle est pratiquement identique pour le calcium et le magnésium (fig. 2). L'échantillon de « tirs » qui a une teneur en calcaire voisine de 15 p. 100 et une

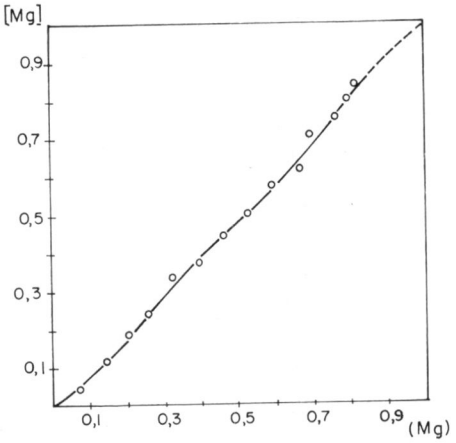


FIG. 2. — *Isotherme d'échange Ca → Mg sur Tirs* (vertisol) *à 25°C*
(Mg) : fraction ionique équivalente de Mg en solution
[Mg] : fraction ionique équivalente de Mg sur le complexe.

CEC de 34 méq/100 g montre une constante thermodynamique d'équilibre de l'échange Ca → Mg à 25°C égale à 1,014. C'est d'ailleurs sur la base de ce dernier résultat que nous avons utilisé dans les solutions de saturation le même rapport Ca/Mg que celui que nous désirions obtenir sur le complexe d'échange des échantillons utilisés lors des essais en pot.

Les résultats obtenus au cours de ceux-ci s'avèrent particulièrement significatifs en ce qui concerne la production végétale brute (fig. 3 *a* et *b*) ; en effet, lorsque le pourcentage de magnésium échangeable passe de 20 à 95, on assiste à une baisse de 20 p. 100 du poids de matière fraîche et de presque 30 p. 100 du poids de matière sèche.

Quant à l'assimilation des éléments nutritifs par la plante, elle subit des variations plus ou moins importantes.

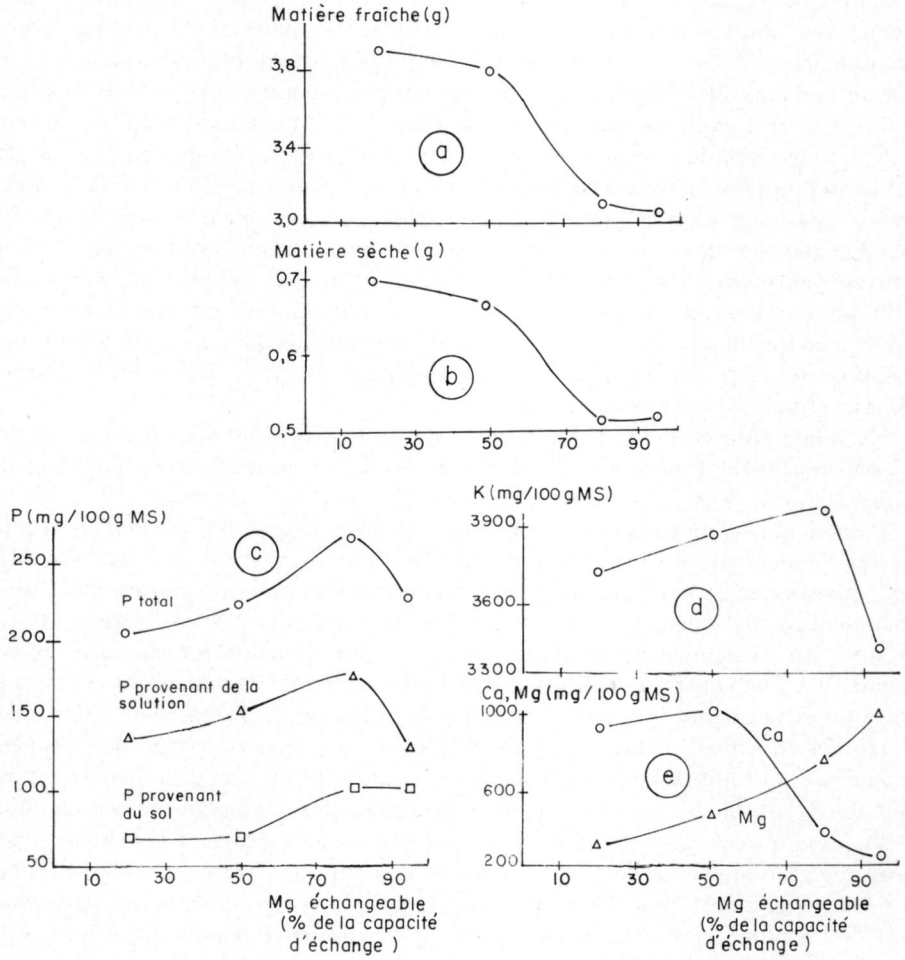


FIG. 3. — *Influence du rapport Ca/Mg sur la croissance et la nutrition du Ray-Grass*

a, *b* : Production végétale (g)
c : Phosphore
d : Potassium } Éléments nutritifs des parties aériennes (mg/100 g MS)
e : Ca et Mg

Selon l'interprétation classique (EDWARDS, 1968 ; FORD, 1966), l'assimilation du phosphore est stimulée par le calcium échangeable, mais lorsque ce dernier fait défaut, le magnésium peut jouer le rôle de stimulant. Les résultats obtenus sont en accord avec cette interprétation, mais lorsque le magnésium échangeable atteint un taux très élevé (rapport Ca/Mg très faible), on constate une diminution très nette du phosphore dans les parties aériennes (fig. 3 *c*). L'utilisation du ^{32}P nous permet en outre de déterminer quelle fraction du phosphore assimilé vient de la solution nutritive et quelle fraction vient du sol lui-même ; en effet, cette seconde source n'est pas marquée et la différence entre les résultats de deux types de mesure (colorimétrie et comptage) nous donne directement la quantité de phosphore assimilée par la plante à partir des réserves du sol. On constate qu'un tiers du phosphore absorbé par la plante provient de cette source et, si on admet que les quantités utilisées par la plante sont directement proportionnelles aux quantités disponibles dans chacune des sources, on peut aisément calculer la quantité A de phosphore disponible dans chaque pot avant qu'on y ajoute la solution nutritive. La valeur de A est un peu plus élevée (16 p.p.m.) pour le quatrième point que pour les trois autres (10 p.p.m.) ; ceci explique sans doute l'absence d'effet dépressif du faible rapport Ca/Mg sur l'assimilation du phosphore à partir du sol (fig. 3 *c*). Le pourcentage d'utilisation du phosphore ajouté a également été calculé ; on trouve des valeurs de l'ordre de 20 p. 100 pour les trois premiers points et de 15 p. 100 pour le quatrième. Ces taux d'utilisation nous semblent extrêmement bas, car en ajoutant la solution nutritive par petites fractions dans un sol dilué dans du sable, nous créons des conditions où la rétrogradation du phosphore assimilable devrait être minime par rapport à ce qu'elle est dans la nature ; nous pourrions dès lors nous attendre à une utilisation de 30 p. 100 ou plus (MASSEY et SHEARD, 1970 ; MATTINGLY, PENNY et BLAKEMORE, 1971 ; MCLEAN et BALAM, 1967).

En valeur absolue, l'effet du rapport Ca/Mg sur le potassium des parties aériennes est beaucoup moins prononcé, on enregistre cependant un abaissement très net de l'utilisation de K, lorsque le taux de magnésium atteint 95 p. 100 (fig. 3 *d*).

Pour ce qui est du calcium et du magnésium, les résulats obtenus sont en accord avec les données de la littérature (MARTIN et PAGE, 1965) ; on constate en effet que la quantité de Ca ou de Mg des parties aériennes varie presque linéairement avec le pourcentage de l'élément considéré par rapport au complexe d'échange du sol (fig. 3 *e*). Au niveau de l'assimilation, il n'y a donc aucune interférence de ces éléments l'un sur l'autre. L'utilisation du ^{45}Ca nous permet également de distinguer deux sources de calcium. On sait en effet que ce radioisotope ne diffuse pratiquement pas dans les cristaux de calcaire (LAHAV et BOLT, 1964) ; dans ces conditions, on peut affirmer que la totalité du ^{45}Ca a été fixée sur le complexe d'échange lors de la préparation des échantillons. Par conséquent, les résultats des comptages ne représentent que du calcium échangeable et la différence entre ces valeurs et les dosages par absorption atomique nous donne le calcium provenant du calcaire du sol. Cette différence est insignifiante pour les trois premiers points alors que, pour le quatrième, le Ca du calcaire représente la moitié du total assimilé. Il semble donc que cette source n'est utilisée qu'en cas de carence grave en calcium échangeable ; en d'autres termes, le calcaire constitue une réserve nutritive difficilement mobilisable par la plante.

CONCLUSIONS

Le rôle de l'ion magnésium dans les sols méditerranéens n'est donc pas négligeable. Sur le plan physico-chimique strict, alors que l'alcalinisation sodique est freinée par une constante d'équilibre de l'échange Ca → Na très faible, l'accumulation sélective du magnésium se situe dans un domaine favorable. Avec $K'_g = 10^{-6,2}$ et $K_z = 1{,}014$, le rapport Ca/Mg sur l'échangeur peut descendre, dans certaines conditions liées à la nature du sol, à l'eau d'irrigation et au climat, jusqu'à une limite fixée par la relation $\bar{a}_{Ca}/\bar{a}_{Mg} \simeq 0{,}008$.

Sur le plan agronomique, cette diminution fait baisser la production végétale brute dans des proportions très importantes et lorsque Ca/Mg atteint des valeurs faibles, on assiste à des troubles de l'assimilation du phosphore et du potassium. En outre, la diminution de ce rapport entraîne un abaissement proportionnel de l'assimilation du calcium et les réserves de calcaire ne constituent pas une ressource suffisante pour la plante.

Reçu pour publication en février 1973.

SUMMARY

SELECTIVE STORING OF MAGNESIUM IN SOILS :
MECHANISM AND INFLUENCE ON GROWTH AND NUTRITION OF ITALIAN RAY-GRASS

This paper reports a study of the effect of the fraction of the cation exchange capacity compensated by magnesium (from 20 to 95 p. 100) on the uptake by ray-grass of phosphate, potassium, calcium and magnesium. A decrease in the uptake of these elements is only observed when the magnesium fraction exceeds 90 p. 100 although the yield in dry matter is depressed at much lower percentages.

A study of the Ca-Mg exchange in the soil used for the uptake experiments has shown that very high fractions in exchangeable Mg could be obtained when carbonate precipitation takes place in the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

SELEKTIVE AUFSPEICHERUNG DES MAGNESIUMS IN DEN BÖDEN :
MECHANISMUS UND AUSWIRKUNG AUF DAS WACHSTUM
UND DIE ERNÄHRUNG DES ITALIENISCHEN RAYGRASS

Die Auswirkung des Magnesiumanteils der austauschbaren Ionen (von 20 bis 95 p. 100) auf die Absorption des Phosphors, des Kaliums und des Magnesiums durch das Raygrass wurde untersucht. Die niederdrückenden Wirkungen eines zu hohen Anteiles an Mg. sind deutlich, aber sie zeigen sich nur, wenn dieser Anteil 90 p. 100 überschreitet. Eine niederdrückende Wirkung auf den Trocken-substanzertrag der Pflanze wird jedoch für weniger bedeutende Anteile festgestellt. — Eine Untersuchung der Wechselverfahren Ca-Mg auf dem Boden, auf dem die Absorptionsversuche der Ionen durch das Raygrass durchgeführt wurden, hat gezeigt dass im Falle eines differentialen Niederschlages von Ca und Mg Carbonaten, sehr gross Werte des Mg^{++} Anteils im Komplexe erreicht werden konnten.

РЕЗЮМЕ

Предпочтительное накопления магния в почве : его механизм и влияние на рост и питание рай-грасса итальянского.

Ф. МУЖЕНО, А. ГАЛЛЕЗ.

Изучалось влияние различных пропорций магния в обменных ионах (от 20, до 95 %) на поглощение фосфора, калия, кальция и магния итальянским рай-грассом. Депрессивные эффекты слишком крупной пропорции магния четко проявляются только в случаях, когда фракция эта превышает 90 %, за исключением депрессивного действия на количество сухого вещества, проявляющегося даже при менее крупных пропорциях магния. Изучение процесса обмена Ca–Mg в почве применявшейся в опытах поглощения ионов рай-грассом показало, что в случае дифференциального осаждения карбонатов кальция и магния, пропорции Mg в комплексе могут достичь очень крупных цифр.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

EDWARDS G., 1968. Cations effects on phosphate absorption from solution by *Trifolium subterraneum*. *Austral. J. Biol. Sci.*, **21**, 1-11.

FORD E. M., 1966. Studies in the nutrition of apple roodstocks. III. Effects of level of magnesium nutrition on growth, form and mineral composition. *Ann. Bot.* **30**, 639-655.

GAINES L. G., THOMAS H. C., 1963. Adsorption studies on clay minerals. II. A formulation of the thermodynamics of exchange adsorption. *J. Chem. Phys.*, **21**, 714-718.

GARRELS R. M., CHRIST C. L., 1965. *Solutions, minerals and equilibria*, 1er éd., 74-83. Harper International Student, New York.

LAHAV N., BOLT G. H., 1964. Self diffusion de Ca^{45} into certain carbonates. *Soil Sci.*, **97**, 293-298.

LEPOUTRE B., SAUVAGEOT A., 1969. Une cause de la saturation magnésienne des argiles dans les sols : l'hydromorphie temporaire de saison chaude. *Cah. Orstom*, série Pédo., VII, 2, 183-201.

MCLEAN E. O., BALAM B. S., 1967. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. III. Uptake by corn from soils of different calcium status. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**, 811-814.

MARTIN J. P., PAGE A. L., 1965. Influence of high and low exchangeable Mg and Ca percentages at different degrees of base saturation on growth and chemical composition of citrus plants. *Plant and Soil*, XXII, 1, 65-80.

MASSEY D. L., SHEARD R. W., 1970. Utilization of surface-applied phosphorus by established stands of alfalfa and bromegrass. *Canad. J. Soil Sci.*, **50**, 9-16.

MATTINGLY G. E. G., PENNY A., BLAKEMORE M., 1971. Evaluation of phosphate fertilizers. III. Immediate and residual values of potassium metaphosphate and magnesium ammonium phosphate for potatoes, radishes, barley and ryegrass. *J. Agric. Sci. Camb.*, **76**, 131-141.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 465-475.

CORRÉLATION ENTRE LE BORE TOTAL DES SOLS CULTIVÉS ET LE BORE TOTAL DES ROCHES DU MASSIF ARMORICAIN

J. MAURICE

Station d'Agronomie, I. N. R. A.,
29000 Quimper

RÉSUMÉ

Le dosage du bore dans les roches du Massif armoricain a permis de montrer que la distribution de cet élément est liée :

— d'une part, aux données pétrographiques : les grès et les granites sont nettement moins bien pourvus en bore que les schistes phylliteux et les schistes micacés,

— d'autre part, dans une certaine mesure, à l'âge de la mise en place des roches : par exemple, les granites de Vire d'âge cadomien sont plus riches que les granulites et les granites porphyroïdes, qui sont surtout hercyniens.

Le même classement se retrouve pour les sols, mais, pour ceux-ci, l'éventail des teneurs est plus resserré, ce qui est interprété partiellement par une teneur constante en bore de l'argile ; de plus, la variabilité relative des résultats est plus faible que pour les roches. Néanmoins, il y a une étroite dépendance statistique entre les teneurs en bore des sols et les teneurs en bore des roches.

INTRODUCTION

La recherche des règles de distribution d'un élément, en vue de mieux aborder l'étude des problèmes de carence, nécessite le dosage de nombreux échantillons représentatifs. C'est sous cet angle que nous avons déjà présenté des aspects de la distribution du bore dans les fractions granulométriques des sols et dans les roches du Massif armoricain (MAURICE, 1971, 1972). L'objet du présent travail, qui complète cette phase d'inventaire, est d'apporter de nouveaux éléments d'information d'ordre statistique sur le bore total dans les principaux types de sols armoricains et sur sa relation avec les roches correspondantes.

I. — MÉTHODES UTILISÉES

Les échantillons de roches ont été prélevés dans des coupes de terrain et à intervalles aussi réguliers que possible à l'intérieur d'une zone géologique donnée. Ces échantillons, composés chacun d'une quinzaine de fragments pris en autant de points sur un affleurement, ont été, après concassage et homogénéisation, broyés pour obtenir une poudre passant au tamis 0,200 mm.

Les échantillons de sols proviennent des mêmes zones géologiques que les roches mais seulement de parcelles cultivées et situées sur des plateaux ou sur des pentes relativement faibles pour éviter les effets du colluvionnement. De plus, pour réaliser un accord plus certain avec la roche-mère, chaque prélèvement de sol est complété par un examen visuel des roches rencontrées à la surface des parcelles. Répartis à l'intérieur d'une zone géologique aussi uniformément que les échantillons de roches, les prélèvements de sols correspondent à la couche arable et sont constitués chacun d'une douzaine de carottes. Après séchage à l'air et tamisage à 2 mm, ces échantillons de sols sont broyés puis tamisés à 0,200 mm. Il s'agit de sols riches en matières organiques, de réaction acide à très acide.

Les roches et les sols proviennent des régions suivantes :

— *Grès silurien :* grès quartzeux. Bordure occidentale (Massif du Ménez-Hom) et orientale (Massifs des Andaines, des Écouves, des Avaloirs, des Alpes Mancelles, des Coëvrons, de Charnie et de Perseigne) du Massif armoricain.

— *Grès carbonifère :* grès micacé à ciment phylliteux abondant. Bassin de Châteaulin (Finistère et Côtes-du-Nord : de Châteaulin à Plounevez-Quintin).

— *Granite à biotite* (type Vire) : quartz, orthose et mica noir en proportions à peu près égales. Massifs de la Basse-Normandie et du Bas-Maine (Massifs de Vire, d'Athis, de la Ferté-Macé, de Lassay et d'Izé).

— *Granite à faciès porphyroïde :* outre sa texture porphyroïde, présente de gros cristaux d'orthose maclés. Massifs de Quintin et de Moncontour (Côtes-du-Nord).

— *Granite à 2 micas* (« granulite ») : riche en mica blanc, au sud de la ligne île de Sein, Quimper. Anticlinal de Cornouaille (Finistère-sud et Morbihan).

— *Schistes briovériens :* phyllades de Saint-Lô. Ce sont des schistes argileux. Ils alternent avec des bancs de grauwacke et de quartzite (Bassin de Plonévez-Porzay, Finistère) ou de grès micacés et feldspathiques (bassins de Pontivy, Morbihan et de Loudéac, Côtes-du-Nord).

— *Schistes dévoniens :* étage des schistes de Plougastel. Ils alternent avec des quartzites. Région de Briec, presqu'île de Crozon et région de Plougastel-Daoulas (Finistère).

— *Schistes micacés et feldspathisés :* quartz et mica noir associé à du feldspath près de la granulite. Pas de variétés compactes, ces roches passent aux cornéennes. Région de Kerfeunteun-Quimper (Finistère) et du Faouët (Morbihan).

— *Micaschistes et schistes micacés staurotidifères :* formés surtout de quartz, mica noir, staurotide et graphite. Zone de Langolen, Coray, Scaër (Finistère) et Guiscriff (Morbihan).

La teneur en bore total de ces roches et sols a été déterminée, après fusion alcaline et reprise à l'acide sulfurique, suivant une technique proposée en 1968 (MAURICE). Rappelons que cette technique colorimétrique au 1-1'-dianthrimide ne comporte pas d'insolubilisation préalable de la silice, cette insolubilisation entraînant des pertes variables en bore. Le dosage, qui s'effectue au spectrophotomètre, permet de doser, dans les conditions de travail adoptées, jusqu'à 2 p.p.m. B dans un échantillon.

II. — RÉSULTATS

Les résultats obtenus pour les roches et les sols apparaissent respectivement aux tableaux 1 et 2.

A. — *Les roches*

Pour les roches, les teneurs moyennes sont voisines des médianes sauf pour les schistes micacés et les micaschistes où quelques valeurs très fortes ont été observées. Ces teneurs moyennes sont comprises entre 11 et 134 p.p.m. B et peuvent être classées en deux groupes ; le premier groupe, caractérisé par les plus faibles teneurs (de 11 à 32 p.p.m. B) assemble les grès et les granites ; le second groupe où les teneurs sont les plus fortes (de 76 à 134 p.p.m. B) comprend les schistes sédimentaires, les schistes micacés et les micaschistes. Ainsi, il apparaît que le bore est lié, préférentiellement, aux schistes phylliteux et micacés. Des hypothèses ont été présentées dans la littérature pour expliquer cette possibilité (MAURICE, 1966 ; SHAW et BUGRY, 1966).

TABLEAU I

Caractéristiques des teneurs en bore total des roches du Massif armoricain

Nature de la roche	Nombre d'échantillons	Teneur moyenne en p.p.m. B	Médiane en p.p.m. B	Coefficient de variation (%)
Grès silurien	28	17,2	14	54,5
Grès carbonifère	20	32,3	30,5	17,7
Granite à biotite (type Vire)	30	25,2	22,5	65,2
Granite porphyroïde	34	13,7	12	58,0
« Granulite »	53	11,1	10	65,7
Schistes briovériens	40	81,7	79,5	26,8
Schistes dévoniens	29	76,2	73	29,1
Schistes micacés et feldspathisés	14	134,1	103,5	73,5
Micaschistes et schistes micacés staurotidifères	12	134,3	89	123,3

Mais, à l'intérieur de l'un ou de l'autre de ces deux groupes de roches, il existe entre des teneurs moyenness des différences significatives au seuil de probabilité de 1 p. 100. En effet, le grès carbonifère (32,3 p.p.m. B) est plus riche que le grès silurien (17,2 p.p.m. B), l'écart entre les teneurs pouvant être interprété par l'existence d'un ciment phylliteux dans le premier type de roches. De même, le granite de Vire (25,2 p.p.m. B) a une teneur significativement plus forte que le granite porphyroïde (13,7 p.p.m. B) et la « granulite » (11,1 p.p.m. B). BERTHOIS (1935) montre que dans le granite à biotite, type granite de Vire, de la partie orientale du Massif armoricain, la tourmaline fait partie du cortège des minéraux lourds et établit que ce minéral est abondant dans la masse même de ce granite. GRAINDOR (in PÉDRO et DELMAS, 1970) précise que le granite de Vire est cadomien et que les deux autres granites sont surtout hercyniens. Il pourrait donc y avoir une relation entre la teneur en bore et l'époque de granitisation.

Constatons aussi que les schistes briovériens (81,7 p.p.m. B) et les schistes dévoniens (76,2 p.p.m. B) se différencient des schistes micacés et feldspathiques (134,1 p.p.m. B) qui sont des roches métamorphiques. On sait que la métasomatose peut être accompagnée d'un apport de bore lorsqu'elle s'effectue en présence de solutions hydrothermales.

Enfin, relevons que les teneurs trouvées ici, par rapport à celles proposées pour la croûte terrestre par TUREKIAN et WEDEPOHL (1961), sont supérieures pour les granites (16,6 contre 10 p.p.m. B) mais inférieures pour les schistes sédimentaires (78,9 contre 100 p.p.m. B), tout en étant du même ordre de grandeur.

B. — *Les sols*

Mis à part les sols sur schistes micacés où quelques fortes valeurs ont été retrouvées, les teneurs moyennes sont nettement plus rapprochées des médianes pour les sols que pour les roches. Mais ici, les teneurs moyennes ne sont plus comprises qu'entre 28 et 94 p.p.m. B. Cependant, malgré ce resserrement de l'étalement des teneurs moyennes, nous retrouvons le même classement en 2 groupes que pour les roches :

TABLEAU 2

Caractéristiques des teneurs en bore total des sols du Massif armoricain

Nature du substratum géologique	Nombre d'échantillons	Teneur moyenne en p.p.m. B	Médiane en p.p.m. B	Coefficient de variation (%)
Grès silurien	27	32,5	32	31,8
Grès carbonifère	47	43,5	43	14,0
Granite à biotite (type Vire)	31	44,1	44	52,0
Granite porphyroïde	37	28,4	29	21,1
« Granulite »	51	33,7	32	28,7
Schistes briovériens	41	65,5	63	17,4
Schistes dévoniens	45	56,6	57	21,4
Schistes micacés et feldspathisés	19	93,5	74	53,5
Micaschistes et schistes micacés staurotidifères	27	79,6	80	12,1

aux sols sur grès et granites (de 28 à 44 p.p.m. B), s'opposent les sols sur schistes sédimentaires et sur schistes métamorphiques (de 56 à 94 p.p.m. B). De plus, il s'établit quasiment la même hiérarchisation des teneurs moyennes à l'intérieur de l'un ou de l'autre de ces groupes. Ainsi, au seuil de probabilité de 1 p. 100, des différences significatives apparaissent entre les teneurs moyennes des sols qui ont les substratums géologiques suivants :

grès silurien < grès carbonifère
granite porphyroïde < granite de Vire
« granulite » < —
schistes dévoniens < schistes briovériens
schistes briovériens < schistes micacés et feldspathisés
schistes briovériens < micaschistes et schistes micacés staurotidifères

Notons aussi que par rapport aux roches, nous avons pour les sols une variabilité relative des résultats moins élevée, ce qui peut s'expliquer par une homogénéisation de la couche arable à la suite de travaux culturaux. Les figures 1, 2, 3 et 4 montrent, à titre d'exemple, la distribution des teneurs pour le granite porphyroïde, les schistes briovériens et les sols correspondants.

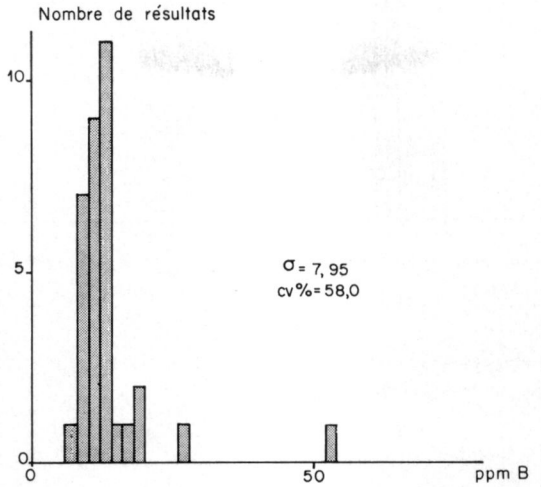


FIG. 1. — *Granite porphyroïde: distribution des teneurs en bore*

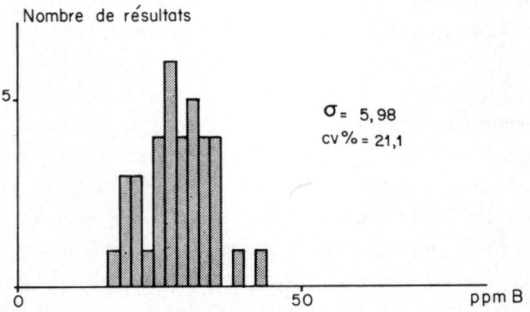


FIG. 2. — *Sols sur granite porphyroïde: distribution des teneurs en bore*

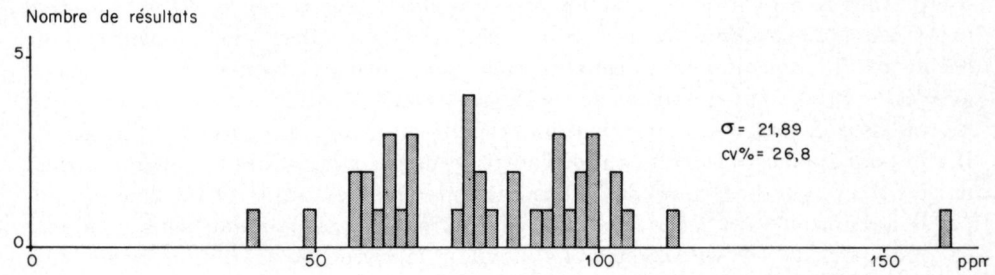


FIG. 3. — *Schistes briovériens: distribution des teneurs en bore*

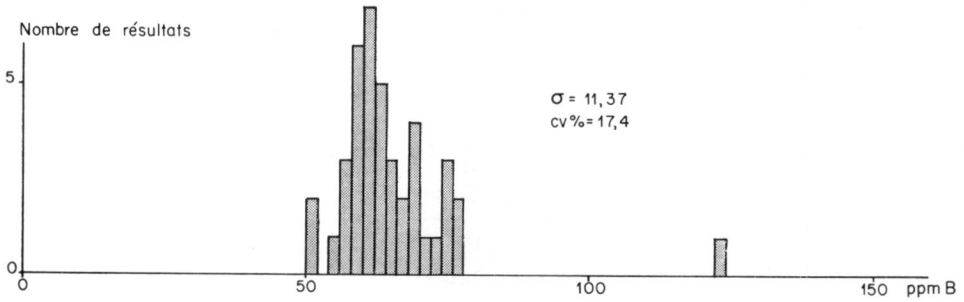


FIG. 4. — *Sols sur schistes briovériens : distribution des teneurs en bore*
σ = écart-type CV p. 100 = coefficient de variation

La question qui se pose est alors la suivante : la mesure de la variable roche peut-elle remplacer celle de la variable sol?

III. — DISCUSSION ET CONCLUSION

Considérons comme variables indépendantes, x, les teneurs moyennes des différentes familles de roches et comme variables dépendantes, y, les teneurs moyennes des sols correspondants. La droite de régression obtenue est représentée sur la figure 5. Cette régression est hautement significative mais le coefficient de régression *byx* a une valeur de 0,440 qui s'écarte notablement de l'unité, valeur du coefficient angulaire de la bissectrice autour de laquelle les points auraient pu être répartis.

Il est évident qu'un sol ne peut refléter exactement le substratum géologique sous-jacent. Mais, dans le cas présent, nous avons d'une part, pour les sols sur grès et granites, des teneurs supérieures à celles des mêmes roches et, d'autre part, pour les schistes phylliteux et les schistes micacés une situation inverse. Ces différences de teneurs entre les variables x et y sont significatives au seuil de probabilité de 1 p. 1000, exception faite de celles concernant les roches métamorphiques et les sols correspondants.

Or, dans une étude sur les fractions granulométriques de 6 types de sols granitiques et schisteux du Massif armoricain (MAURICE, 1971), chaque type de sols comportant 10 échantillons, il s'avère que *la teneur en bore de l'argile est pratiquement indépendante de celle du sol et égale en moyenne à 58 p.p.m.* alors que la teneur en bore des autres fractions minérales est en corrélation positive et hautement significative avec celle du sol. Apparemment, le constituant argileux intervient soit pour enrichir les sols issus de grès et granites dont les teneurs sont comprises entre 11 et 32 p.p.m. B, soit pour appauvrir les sols issus de l'autre groupe de roches dont les teneurs varient de 76 à 134 p.p.m. B. D'après des déterminations effectuées sur 6 échantillons d'argile par le Laboratoire des Sols de Versailles, les minéraux prédominants sont la chlorite et l'illite pour les sols sur schistes phylliteux, et la vermiculite, l'illite et la kaolinite pour les sols sur granites.

Formulons l'hypothèse où la teneur en bore de l'argile correspond exactement à la teneur moyenne en bore de la roche. Entre cette valeur hypothétique et la valeur

moyenne observée de 58 p.p.m. B, nous obtenons des écarts positifs ou négatifs qui, multipliés par les pourcentages en argile des sols, conduisent à des termes à ajouter ou à retrancher des valeurs moyennes en bore établies pour les sols. Selon des travaux

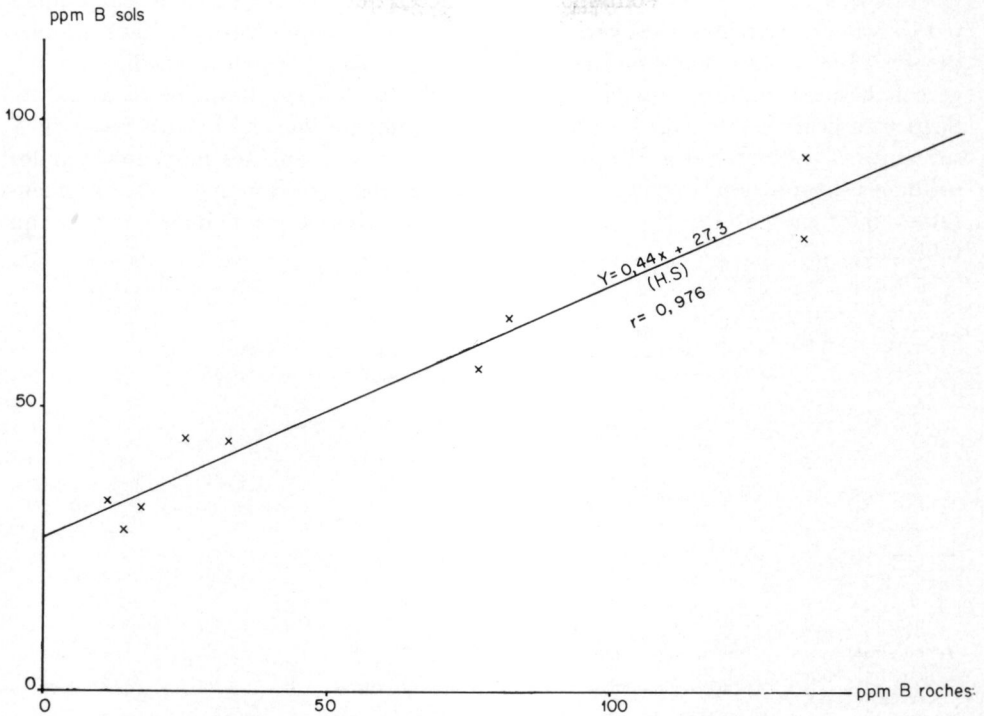


FIG. 5. — *Régression de la teneur en bore des sols en fonction de la teneur en bore des roches* (325 échantillons de sols et 260 échantillons de roches en 9 groupes)

réalisés à la Station d'Agronomie de Quimper (COPPENET et HÉLIAS, 1958 ; COPPENET et RAMPON, 1967 ; DUVAL, 1962, 1964 ; MAURICE, 1971), les pourcentages en argile des différents types de sols sont, en moyenne, les suivants :

	P. 100
grès silurien	10
grès carbonifère	17
granites	11
schistes sédimentaires	17
schistes micacés et micaschistes	15

Nous obtenons ainsi pour les sols une nouvelle série de variables *y*. La nouvelle régression obtenue est également hautement significative mais le nouveau coefficient de régression *byx*, qui se situe à 0,577, est amélioré par rapport au précédent. La différence entre les deux coefficients de régression est significative au niveau de probabilité de 5 p. 100, ce qui revient à dire que l'argile joue effectivement le rôle d'un diluant.

Parmi les autres facteurs pouvant être à l'origine des différences de teneurs en

bore entre roches et sols correspondants, il peut être envisagé notamment les trois éléments suivants :

1° Les moyennes établies diffèrent des vraies moyennes qui sont inconnues. On sait que les médianes sont moins influencées que les moyennes arithmétiques par les valeurs extrêmes de la variable. Donc, prenons comme variables les médianes des sols et des roches, de même en ce qui concerne les sols, prenons les médianes corrigées de la même manière que plus haut. Il en résulte de nouvelles régressions hautement significatives et, pour les coefficients de régression *byx*, les valeurs respectives suivantes : 0,487 et 0,664. Il apparaît que le remplacement des moyennes par les médianes entraîne une augmentation du coefficient de régression, mais cette augmentation n'est pas significative. Les corrélations relatives à ces données figurent au tableau 3.

TABLEAU 3

Covariation des teneurs en bore total des roches et des teneurs en bore total des sols du Massif armoricain

Sols	Roches	Coefficient de régression	Coefficient de corrélation	Écart-type d'estimation	Probabilité de la régression et de la corrélation
y	*x*	*byx*	*r*	*s Dyx*	P
Teneurs moyennes..	Teneurs moyennes	+ 0,440	+ 0,976	5,3	< 0,001
Teneurs moyennes.. corrigées	Teneurs moyennes	+ 0,577	+ 0,987	5,2	< 0,001
Médianes	Médianes	+ 0,487	+ 0,965	5,3	< 0,001
Médianes corrigées..	Médianes	+ 0,664	+ 0,970	6,7	< 0,001

Toutes ces corrélations sont ainsi positives, très fortes et hautement significatives. Remarquons aussi, d'après ce tableau 3, que les écarts types d'estimation sont sensiblement constants et relativement faibles.

2° Il existe des différences de composition minéralogique entre roche et terre fine tamisée à 2 mm. Il conviendrait de voir, entre autres, leur proportion en quartz, minéral qui a une très faible teneur en bore et se retrouve en partie dans les refus de tamisage des sols à 2 mm, surtout dans ceux concernant les sols quartzeux et granitiques, ce qui a pour effet de relever la teneur en bore de ces mêmes sols, après tamisage. Inversement, ce tamisage risque de ne pas éliminer la totalité des quartzites qui alternent avec les schistes phylliteux, ce qui a pour résultat une diminution de la teneur en bore de ces sols.

3° La matière organique des sols intervient dans la dilution des teneurs. En effet, si tout le bore soluble à l'eau des sols provenait de la matière organique, celle-ci contiendrait environ 10 p.p.m. B (on conçoit qu'une part de ce bore soluble peut provenir aussi de l'acide borique et des borates présents dans les sols). Cette donnée est voisine de la teneur de la granulite et du granite porphyroïde mais fort éloignée

de celle des schistes. Or, les sols étudiés sont tous riches en matière organique, la perte au feu conduisant à des valeurs comprises entre 5 et 10 p. 100. Évidemment, pour effectuer des calculs rigoureux, il serait nécessaire de connaître la teneur exacte en bore de la matière organique des sols.

En définitive, malgré l'écart observé entre les variables, écart partiellement interprété par une teneur constante en bore de l'argile, le rôle du quartz et de la matière organique restant à préciser, il y a une étroite dépendance statistique entre les teneurs des roches et les teneurs des sols. La connaissance de la teneur en bore total du sol peut, de ce fait, être déduite de celle de la roche au moyen d'une équation de régression, celle calculée à partir des moyennes étant la suivante :

$$y = 0{,}44x + 27{,}3$$

On peut donc, mais indirectement, utiliser les données pétrographiques en agronomie, par exemple pour réaliser des cartes géochimiques des formations de surface.

Reçu pour publication en avril 1973.

SUMMARY

CORRELATION BETWEEN TOTAL BORON OF CULTIVATED SOILS AND TOTAL BORON OF THE ROCKS OF THE ARMORICAN MASSIF

The titration of boron in the rocks of the Armorican Massif has made it possible to show that the distribution of this element is linked :

— on the one hand, to petrographic data : the sandstones and granites are distinctly less well supplied with boron than the phyllital and micaceous schists ;

— on the other hand, in some way, to the time of rock formation : for example, the granites of Vire, belonging to the Cadomian Age, are richer than the granulites and porphyroid granites which are principally Hercynians.

The same classification is found for soils, but for the latter the range of amounts is more restricted, which is partially interpreted by a constant boron content of the clay ; also, the relative variability of the results is less than that of the rocks. Nevertheless, there is a close statistical dependence between the boron contents of the soils and the boron contents of the rocks.

ZUSAMMENFASSUNG

BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM GESAMTBORGEHALT DER BEBAUTEN BÖDEN UND DEM GESAMTBORGEHALT IM GESTEIN DES ARMORIKANISCHENGEBIRGES

Die Bestimmung des Borgehalts im Gestein des Armorikanischen Gebirges hat gezeigt, dass die Verteilung dieses Elementes an folgende Faktoren gebunden ist :

— einerseits an die petrographischen Gegebenheiten : die Sandsteine und Granite sind wesentlich weniger borhaltig als die Phyllit- und Glimmerschiefer,

— andererseits in gewissem Ausmass and as Ablagerungsalter des Gesteins : die Granite von Vire zum Beispiel sind borreicher als die Granulite und porphyroiden Granite, die hauptsächlich herzynischen Ursprungs sind (erstere sind cadomischen Ursprungs).

Die gleiche Einteilung gilt für die Bodenarten, aber hier variiert der Borgehalt in einem engeren

Bereich, was sich teilweise aus einem konstanten Borgehalt des Tons erklärt ; ausserdem ist die relative Schwankung der Resulte geringer als bei den Gesteinen. Es besteht jedoch eine enge statistische Abhängigkeit des Borgehalts der Böden und des Borgehalts der Gesteine.

РЕЗЮМЕ

Ж. МОРИС.

Корреляция между общим содержанием бора в окультуренных почвах и в породах Арморикансного Массива.

Дозировка бора в породах Арморикансного Массива позволила выяснить существование связи распределения этого элемента :

— С петрографическими данными, с одной стороны : песчаники и граниты содержат гораздо меньше бора чем глинистые или слюдяные сланцы;

— С другой стороны и, в некоторой только мере, с периодом образования породы, например : граниты Вира, образовавшиеся в период Кадома более богаты бором чем гранулиты, или порфироидные граниты герцинского периода.

Но для почв, при той-же что и для пород классификации, веер процентных содержаний бора менее широк, что частично об'ясняется постоянным содержанием этого элемента в глине; кроме того, в случае почв, изменчивость полученных результатов менее велика, чем у пород. Существует однако, тесная статистическая зависимость между процентными содержаниями бора в почвах и в породах.

REMERCIEMENTS

Nous remercions M. G. PÉDRO et ses collaborateurs de la Station d'Agronomie du C. N. R. A. (Versailles) pour les déterminations minéralogiques d'argile.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BERTHOIS L., 1935. *Recherches sur les minéraux lourds des granites de la partie orientale du Massif armoricain*, tome II. Thèse Université, Rennes.

COPPENET M., HÉLIAS M., 1958. Les sols de la région de Gourin. *Ann. agron.*, **9** (2), 217-255.

COPPENET M., RAMPON A., 1967. Contribution à l'étude des sols schisteux et granitiques de Bretagne. *Ann. agron.*, **18** (5), 455-484.

DUVAL L., 1962. Sur les caractères pédologiques et agronomiques des sols gréseux du nord de la Mayenne. *Bull. Mayenne Sci.*, 1-17.

DUVAL L., 1964. Les sols de Kerfeunteun-Quimper. *Ann. agron.*, **15** (5), 551-581.

GRAINDOR M.J-., in : PÉDRO G., DELMAS A. B., 1970. Les principes géochimiques de la distribution des éléments-traces dans les sols. *Ann. agron.*, **21** (5), 483-518.

MAURICE J., 1966. Géochimie du bore. *Ann. agron.*, **17** (4), 367-402.

MAURICE J., 1968. Dosage colorimétrique du bore total des minéraux, des roches et des sols au moyen du 1-1'dianthrimide. *Ann. agron.*, **19** (6), 699-704.

MAURICE J., 1971. Sur la distribution du bore dans les fractions granulométriques de divers sols schisteux et granitiques du Massif armoricain. *C. R. Acad. Agric.*, 553-565.

MAURICE J., 1972. Teneurs en bore des principales roches du Massif armoricain. *C. R. Acad. Sci.*, **274**, 1769-1771.

SHAW D. M., BUGRY R., 1966. A review of boron sedimentary geochemistry in relation to new analyses of some north american shales. *Canad. J. Earth Sci.*, **3**, 49-63.

TUREKIAN K. K., WEDEPOHL K. H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **72** (2), 175-192.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 477-501.

ÉTUDE DES FACTEURS MODIFIANT LA COMPOSITION DE LA SÈVE DE PRINTEMPS DES ARBRES FRUITIERS

J.-G. HUGUET
avec la collaboration technique de J. GIRAUDON

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,
Domaine de la Grande-Ferrade,
33140 Pont de la Maye

RÉSUMÉ

La composition de la sève extraite du bois des arbres fruitiers au début du printemps varie :

a) suivant les conditions du prélèvement (date, heure, profondeur dans l'arbre, hauteur et orientation sur le tronc) ;

b) suivant la variété, l'espèce, l'intensité de l'alternance chez le pommier « Golden Delicious ».

L'analyse de sève pourrait permettre de contrôler l'efficacité de la taille et de prévoir l'intensité de l'éclaircissage nécessaire pour limiter les effets de l'alternance.

I. — INTRODUCTION

Le printemps — ou plutôt le moment d'entrée en activité qui marque pour les végétaux ligneux pérennes la fin de l'hiver — est une période particulièrement importante. En effet, il y a reprise de la croissance de tous les tissus à partir desquels s'élaborent la récolte annuelle et les organes initiaux de la récolte suivante.

Cette période est caractérisée par une « montée de sève », c'est-à-dire par une augmentation notable de la quantité de liquide présent dans les vaisseaux du bois. Ce phénomène entraîne parfois des écoulements spontanés à partir d'une plaie fraîche, c'est le cas notamment des pleurs de la Vigne et du sirop de l'Érable à sucre. A cette saison, les réserves accumulées dans les parties pérennes l'année précédente sont mobilisées et migrent vers les zones de croissance active.

C'est dans le but d'obtenir des renseignements sur la capacité, pour un arbre fruitier, de mener à bien une récolte annuelle rentable sans diminuer sa productivité future que nous avons entrepris cette étude sur la sève de printemps.

En effet, il paraissait logique de supposer qu'une appréciation des teneurs en éléments minéraux et en composés organiques présents dans la sève à cette période pourrait apporter des indications sur la physiologie de l'arbre. De plus, le caractère précoce des prélèvements laissait espérer que les données obtenues permettraient, le cas échéant, une intervention efficace dans l'année même.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Matériel végétal*

Le verger de pommiers sur lequel nous avons réalisé l'essentiel de notre travail est situé en bordure de la Garonne, sur des alluvions récentes. Il comporte des rangs alternés de « Golden Delicious » et de « Richared », âgés de 12 ans en 1970, greffés sur franc, en forme libre.

Les résultats concernant le Prunier et le Pêcher ont été acquis sur des arbres du domaine I. N. R. A. de la Grande-Ferrade, en sol sablo-graveleux.

B. — *Méthode de prélèvement de sève* (fig. 1)

La méthode utilisée est celle mise au point au laboratoire (HUGUET et SAVE, 1969). Elle consiste en une aspiration directe dans les vaisseaux du bois, réalisée à l'aide d'un trocard (diamètre de 1 à 2 mm) introduit à force dans le bois. Dès son prélèvement, l'échantillon de sève est placé

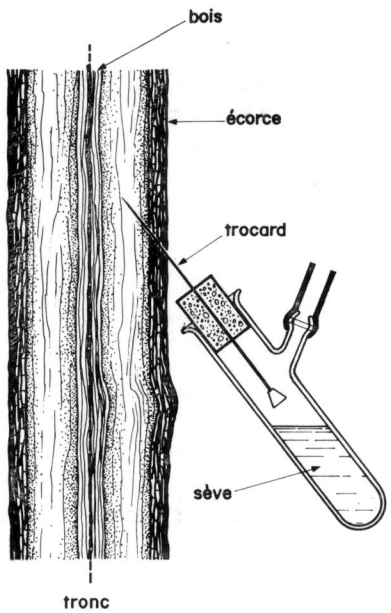


FIG. 1. — *Prélèvement de sève*

dans un récipient calorifugé contenant de la glace carbonique, puis conservé en congélateur à — 18°C jusqu'au moment de l'analyse. La sève extraite est un liquide ayant l'aspect et la viscosité apparente de l'eau. Abandonnée à l'air à la température ambiante, cette sève peut prendre une coloration plus foncée.

C. — *Méthodes d'analyses*

L'échantillon sorti du congélateur est rapidement amené à 20°C, puis filtré sous vide sur verre fritté (diamètre moyen des pores 10 à 20 μ). Cette opération est nécessaire pour débarrasser la sève des quelques très petits fragments de bois ou d'écorce récoltés au moment du prélèvement.

— *Azote total et phosphore total* ont été dosés par la méthode décrite par ROUTCHENKO (1967), après minéralisation par l'acide sulfurique et neutralisation de la partie aliquote entre pH 4 et 5 par de la lessive de soude.

— *Potassium, calcium et magnésium* ont été dosés par spectrophotométrie de flamme en milieu oxine (DELAS, 1964).

— Le *carbone total* a été dosé avec l'analyseur automatique de carbone Leco, dans lequel tout le carbone de l'échantillon est transformé en CO_2 par combustion dans un four à induction balayé par un courant d'oxygène ; les gaz passent ensuite à travers un analyseur mesurant leur conductivité (TABATABAI et BREMMER, 1970). Cet appareil étant prévu pour l'analyse d'échantillons solides et les creusets réfractaires étant trop poreux pour recevoir directement un liquide, nous avons dû effectuer une fixation préalable de la sève sur un support absorbant, suivie d'un séchage. Le support de fixation le plus satisfaisant a été le mélange, à poids égal, d'alumine recalcinée (Al_2O_3) et d'oxyde de cuivre (CuO). Sur un verre de montre, on pèse 1 g du mélange précédent sur lequel on dépose 0,5 ml de sève. Le tout est passé à l'étuve à 60°C pendant 4 heures, puis le contenu du verre de montre est transvasé dans un creuset réfractaire. Il faut prévoir des échantillons sans sève afin de tenir compte de la teneur en carbone du support (surtout par fixation du CO_2 ambiant).

— Les *sucres* ont été dosés par la méthode de SOMOGYI et NELSON (SOMOGYI, 1952 ; MARAIS *et al.*, 1965).

— Les mesures du *pH* et de la *résistivité* ont été faites immédiatement après la filtration, en veillant à ce que la température soit constante.

III. — RÉSULTATS

A. — *Conditions de prélèvement*

1. *Origine de la sève extraite.*

La technique même de prélèvement impose d'introduire le trocard utilisé assez profondément dans le bois. L'aspiration se pratique donc dans les vaisseaux du xylème. Pour avoir une idée de la zone influencée par ce prélèvement sous vide, nous avons réalisé l'expérience suivante : sur un prunier cultivé depuis 3 ans en solution nutritive (hauteur 150 cm, diamètre du tronc 3,5 cm), nous avons fait un prélèvement de sève à un centimètre de profondeur au moment de la floraison. La sève a été recueillie dans une microfiole à vide, contenant un peu de bleu de méthylène en poudre ; au bout du quart d'heure de prélèvement, nous avions récolté environ 1 ml de sève intensément colorée en bleu. Par retournement de la fiole et remplacement de la pompe à vide par un compresseur réglable, nous avons alors réinjecté cette sève colorée. La durée de la réintroduction de la sève a été voisine de la durée de prélèvement. L'injection de sève terminée, nous avons débité l'arbre en tronçons de 2 à 3 cm. Notre hypothèse était qu'en opérant rapidement, sans bouger la pointe de prélèvement, la sève extraite avait une forte probabilité de retour vers les tissus dont elle avait momentanément été extraite. Les résultats de cet essai sont traduits dans la figure 2, où sont représentées en grandeur réelle les traces colorées telles qu'elles sont apparues sur les coupes transversales du tronc.

On constate tout d'abord que le volume de bois coloré a une importante extension verticale (43 cm) tandis que sa section a toujours une surface très réduite (11 mm^2

au maximum). Les vaisseaux concernés correspondent à l'anneau de bois de printemps atteint par l'extrémité du trocard. La diffusion radiale semble très limitée. Si l'on fait une évaluation du volume de bois coloré, on trouve approximativement 1,9 ml, ce qui paraît compatible avec le volume de sève prélevé (1 ml).

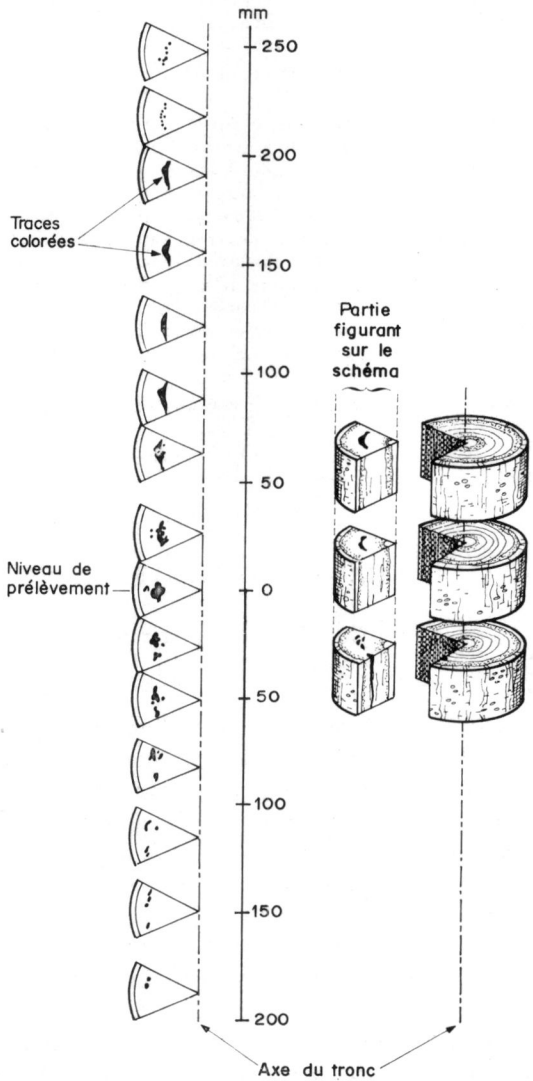


FIG. 2. — *Traces du passage de la sève sur les sections du tronc*

La sève extraite provient donc du bois — et même d'une faible section de celui-ci — correspondant à une fraction d'un même anneau saisonnier. Nous avons observé, dans d'autres essais sur pruniers, que l'augmentation de la quantité de sève prélevée accroissait surtout l'extension verticale de la zone atteinte, les vaisseaux ainsi vidés subissant toujours une nécrose irréversible se traduisant par la mort du tissu atteint.

2. *Évolution saisonnière de la tension de sève et détermination de l'époque favorable au prélèvement.*

Au cours de plusieurs années de prélèvement, nous avons pu chaque année noter avec précision le moment où celui-ci devenait impossible ; par contre, nous n'avons pas encore pu préciser le début de la période pendant laquelle il était réalisable. Pendant quatre ans, nos prélèvements (région bordelaise) se sont étalés du mois de mars au début avril (tabl. 1).

TABLEAU I

Périodes de prélèvement de sève

Année	Espèce	Stades phénologiques (1)	Période de prélèvement		
			Début		Fin
			théorique	pratique	
1968	Prunier	E-F	non déterminé	8 mars	17 mars
1969	Prunier	E-F	*d°*	10 mars	24 mars
1970	Pommier	B-C	*d°*	10 mars	26 mars
1971	Pommier	B-C	*d°*	16 mars	13 avril

(1) Stades phénologiques selon FLECKINGER.

Il faut remarquer que, tous les ans, la période favorable s'interrompt brutalement. Si l'on veut comprendre les raisons de l'efficacité temporaire de notre mode de prélèvement de sève, il faut tenir compte des modifications saisonnières de la tension de la sève des végétaux ligneux pérennes.

Il est admis actuellement que, dans un végétal ligneux, la circulation de sève dans les vaisseaux du bois se produit sous l'influence de deux phénomènes (HELLER, 1969) :

— la poussée radiculaire, qui pourrait prendre des valeurs de l'ordre d'une à plusieurs atmosphères ; il s'agit là d'un phénomène actif lié au métabolisme et dont l'origine se situe au niveau de l'activité physiologique particulière des cellules de l'endoderme des racines ;

— un appel, dû à la transpiration des parties aériennes, se traduisant par une traction sur les colonnes d'eau allant de la racine aux feuilles ; cette traction est transmise à l'ensemble d'une colonne grâce aux forces de cohésion moléculaire (théorie de Dixon). On a pu ainsi mesurer des forces de cohésion de sève assurant une résistance à la traction jusqu'à 20 atmosphères.

Étant donné que la plupart du temps, sous nos climats, la sève est sous tension et non pas sous pression, on considère que la poussée radiculaire, certainement efficace lorsqu'il n'y a pas de transpiration, devient accessoire lorsque celle-ci intervient ; c'est alors essentiellement la transpiration qui, par le jeu des forces de cohésion,

est responsable de la circulation d'une sève sous tension dans toutes les parties aériennes.

Le tableau 2 montre les relations que l'on peut imaginer entre l'état végétatif d'un arbre et l'état de la sève. On peut distinguer trois phases principales pour ce qui est de la facilité de prélèvement direct de la sève à partir des parties aériennes :

— une période se situant en fin d'hiver, au moment de la reprise de l'activité du végétal, pendant laquelle la sève serait sous pression sous l'effet d'une poussée radiculaire active. A ce stade, la sève doit s'écouler spontanément par les blessures, c'est le cas des pleurs de la Vigne et de la sève de l'Érable à sucre. Ce stade ne semble pas exister habituellement pour les rosacées fruitières de nos climats, pour lesquelles il est très exceptionnel de constater un écoulement spontané de sève ;

— dans le cas des arbres fruitiers à feuilles caduques, la sève se trouve donc toujours sous tension mais, suivant la saison et le stade végétatif, cette tension est plus ou moins forte. La période de tension la plus faible se situe alors en fin d'hiver, au moment du débourrement ; à cette période, le prélèvement de sève à partir d'une pompe aspirante ne pourra, par principe, être efficace que si la tension de la sève reste inférieure à une atmosphère.

Comment expliquer qu'à cette époque — où les feuilles sont inexistantes, donc la transpiration très faible — la sève soit cependant sous tension ? On peut supposer que pendant cette période, où la température encore basse du sol limite l'absorption d'eau, la consommation d'eau nécessaire au métabolisme et à la compensation des pertes par les parties pérennes suffit pour maintenir la sève sous tension. En effet, il s'agit d'une phase de mobilisation des réserves par hydrolyse des formes de stockage. Pendant cette période, la tension de la sève qui était supérieure à une atmosphère pendant l'hiver (prélèvement direct impossible) diminue pour s'approcher de zéro à mesure que la poussée radiculaire augmente ; le végétal semble s'imbiber d'eau jusqu'au stade où, les feuilles se développant, la transpiration augmente rapidement et la tension dépasse alors l'atmosphère.

— à partir de ce stade, la tension de la sève dans les parties aériennes du végétal restera supérieure à 1 atmosphère jusqu'au printemps suivant, avec des fluctuations que l'on peut supposer en relation avec la disponibilité de l'eau du sol et l'importance de la transpiration. Une mesure directe de la tension de sève à cette période pourrait être un guide précieux dans la conduite de l'irrigation.

Il faut cependant noter qu'il y a un gradient de tensions croissantes depuis les racines, siège de l'absorption d'eau et de la poussée radiculaire, jusqu'aux feuilles, siège de la transpiration.

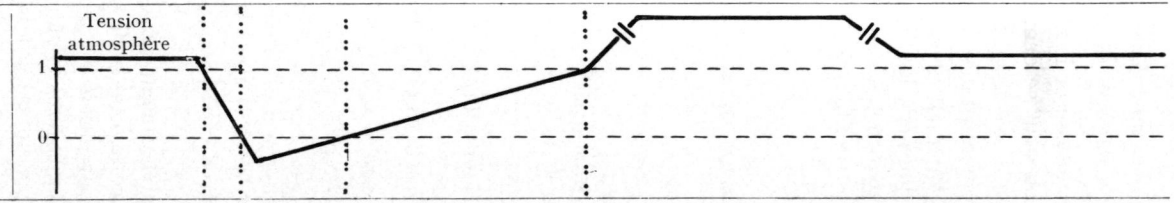
Pendant toute cette dernière période, le prélèvement direct de sève à partir des parties aériennes demeure impossible ; par contre, on peut recueillir dans certains cas de la sève expulsée par la poussée radiculaire à partir de la section d'une racine.

3. *Variations diurnes de la tension de sève.*

Les prélèvements ne sont possibles qu'à partir du milieu de la matinée jusqu'aux environs de 19 heures. De plus, la durée du prélèvement d'un même volume de sève augmente au cours de la journée. Ceci permet de supposer que cette durée de prélèvement, en relation avec l'intensité de l'absorption active d'eau par les racines, dépend d'un rythme nycthéméral de cette dernière. Le rythme d'absorption pourrait varier avec la température du sol.

TABLEAU 2

Cycle saisonnier des mouvements d'eau dans le bois des végétaux pérennes à feuilles caduques

Saisons	Hiver	Printemps	Été	Automne
Stade végétatif	Repos végétatif	Reprise végétative Développement des bourgeons Croissance des feuilles	Pleine végétation Chute des feuilles	Repos végétatif
Importance des besoins en eau du végétal	faibles Évaporation des parties pérennes	en augmentation Consommation métabolique	très élevés Transpiration des feuilles	faibles Évaporation des parties pérennes
Poussée radiculaire et importance de l'absorption d'eau par le végétal	très faibles à nulles	en augmentation	Fonction de la disponibilité de l'eau dans le sol	très faibles à nulles
Tension de la sève				
Méthodes directes de mesure de la tension de sève	Pas de méthode	Manomètres (tensiomètres)	Pas de méthode	
Méthodes directes de prélèvement de sève	Pas de méthode	A : Écoulement spontané A : aspiration par pompe à vide	Pas de méthode	

4. *Influence des conditions du prélèvement sur la composition de la sève d'un même arbre.*

a) *Influence de la hauteur du prélèvement.*

Étant donné l'étroitesse et l'extension verticale de la zone du xylème atteinte par le prélèvement, on peut se demander si la hauteur du prélèvement modifie la composition de la sève. Dix échantillons ont donc été prélevés sur un même pommier « Golden », à profondeur constante et à 20 cm d'intervalle le long de la même génératrice, en partant du tronc au niveau du sol. Tous les prélèvements ont été réalisés dans la même demi-journée ; les échantillons ont été divisés en deux lots : ceux provenant du tronc (20 à 100 cm) et ceux prélevés sur la charpentière (120 à 200 cm). Le tableau 3 donne les résultats de cet essai.

TABLEAU 3

Composition de la sève du tronc et d'une charpentière sur une même génératrice
(en mg/l de sève)

	pH	Résistivité (1)	K	Ca	Mg	N total	P total	Sucres		C
								Réduc.	tot.	
Tronc (20 à 100 cm)	7,08	6 441	13,60	31,8	8,9	39,4	2,2	25,6	53,9	3 404
Charpentière 120 à 200 cm	7,29	6 844	19,14	30,3	11,6	53,3	3,5	25,0	54,9	3 896
F calculé	4,20	0,50	2,77	0,26	4,07	7,50*	5,79*	0,06	0,02	2,05

(1) Résistivité en Ω/cm.
* Significatif au seuil de 5 p. 100.
Chaque valeur correspond à la moyenne de cinq échantillons.

La hauteur du prélèvement dans les parties aériennes ne modifie significativement que les taux d'azote total et de phosphore total.

La sève de la charpentière est plus riche que celle du tronc pour ces deux éléments, ce qui peut s'expliquer si l'on admet que les réserves d'azote et de phosphore sont d'autant plus importantes que l'on se rapproche des zones de photosynthèse active de l'année précédente.

A partir des résultats regroupés des dix prélèvements, nous avons déterminé la variabilité de la composition de la sève ; pour l'azote et le phosphore total, les résultats du tronc et de la charpentière ont été séparés puisqu'ils étaient significativement différents (tabl. 4).

Les coefficients de variation sont différents suivant les déterminations, et parfois très élevés ; cela s'explique notamment par les très faibles quantités de certains éléments pour lesquels les erreurs relatives de dosage doivent être du même ordre de grandeur que la variabilité propre. On peut remarquer la grande stabilité du pH, qui témoigne de l'existence dans la sève de substances à pouvoir tampon : acides

organiques, acides aminés, etc. On note que, pour l'azote total et le phosphore total, les coefficients de variation des échantillons provenant de la charpentière sont plus élevés que ceux des échantillons provenant du tronc.

TABLEAU 4

Variabilité de la composition de la sève prélevée sur une même génératrice d'un arbre

	Origine	Moyenne $\bar{m}$	Écart-type σ	Coefficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{m}}$ (%)	Intervalle de confiance
pH	T + C	7,19	0,2	3	7,03 – 7,34
Résistivité (Ω/cm)	T + C	6 600	911	14	5 913 – 7 286
K (mg/l)	T + C	15,9	5,9	36	11,5 – 20,3
Ca (mg/l)	T + C	30,2	3,7	12	27,4 – 33,0
Mg (mg/l)	T + C	10,0	2,4	24	8,2 – 11,8
Sucres réducteurs (mg/l)	T + C	24,3	3,2	13	21,9 – 26,7
Sucres totaux (mg/l)	T + C	53,3	11,8	22	44,4 – 62,2
Carbone (mg/l)	T + C	3 660	607	17	3 200 – 4 117
N total[1] (mg/l)	T	39,4	4,8	12	33,9 – 44,9
	C	53,3	10,3	19	41,5 – 65,2
P total[1] (mg/l)	T	2,2	0,4	19	1,70 – 2,62
	C	3,5	1,2	35	2,14 – 4,94

T = prélèvements venant du tronc.
C = Prélèvements venant de la charpentière.
Données corespondant à dix prélèvements réalisés dans la même demi-journée, sur un pommier « Golden Delicious », à 20 cm d'intervalle, sur une même génératrice.
[1] 5 prélèvements pour N et P.

b) *Influence de la profondeur et de l'orientation du prélèvement.*

Nous avons vu à propos de l'origine de la sève extraite que celle-ci semblait provenir d'une zone assez limitée correspondant à une couche annuelle de xylème. On peut alors se demander si la composition de la sève n'est pas modifiée suivant la profondeur (ou l'âge) de la couche atteinte par l'extrémité du trocard. Pour vérifier cette hypothèse, on a prélevé de la sève sur deux arbres, à trois profondeurs (1,5, 2,5, 3,5 cm), avec quatre répétitions au même niveau sur le tronc (répétitions orientées selon les quatre points cardinaux).

Dans un premier temps, on a cherché à distinguer l'effet « profondeur », l'effet « arbre », et l'interaction de ces deux effets (tabl. 5). On ne constate pas d'effet significatif (au seuil de 5 p. 100) de la profondeur, quelle que soit la détermination, bien que cet effet se rapproche du seuil significatif pour le calcium et le phosphore total pour lesquels les teneurs ont tendance à diminuer avec la profondeur. Par contre, l'effet « arbre » est significatif pour cinq déterminations (pH, K, Ca, Mg, résistivité) et hautement significatif pour l'azote total. L'origine de l'effet « arbre » sera discutée plus loin.

La profondeur n'ayant pas d'influence significative sur la composition moyenne de la sève, il était légitime de chercher à préciser l'influence de l'orientation du prélèvement (tabl. 6). Seuls le pH et la teneur en azote total réagissent d'une façon hau-

TABLEAU 5

Influence de la profondeur du prélèvement sur la composition de la sève

Arbre n°	Profondeur prélèvement (cm)	pH	Résistivité (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P (mg/l)	Carbone (mg/l)
1	1,5	6,92	6 240	6,5	30,3	9,5	23,5	5,2	1 760
	2,5	7,22	7 050	8,8	26,8	9,1	23,1	2,9	1 080
	3,5	7,15	6 940	12,8	23,7	9,0	18,9	2,0	470
2	1,5	6,90	7 300	32,3	23,9	8,7	33,8	6,9	1 360
	2,5	6,85	7 800	17,1	17,3	7,1	32,9	2,6	1 550
	3,5	6,96	6 960	18,5	24,1	6,9	34,7	2,8	1 350
F profondeurs		1,01	2,28	0,36	2,58	0,96	0,03	3,07	1,66
F arbres		4,98*	5,67*	6,50*	7,79*	4,43*	16,52**	0,14	1,00
F interaction		1,57	1,39	1,09	1,71	0,02	0,48	0,26	2,15

Nota : Chaque valeur du tableau supérieur représente la moyenne de 4 déterminations correspondant aux 4 prélèvements réalisés à la même profondeur, au même niveau sur le tronc et aux quatre orientations cardinales.

* Significatif au seuil de 5 p. 100.

** Significatif au seuil de 1 p. 100.

TABLEAU 6

Effets de l'orientation du prélèvement sur la composition de la sève

(Chaque valeur représente la moyenne des trois résultats correspondant aux prélèvements de même orientation à des profondeurs variables)

Arbre n°	Orientation	pH	Résistivité (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Carbone (mg/l)
1	Sud	6,85	6 820	10,8	26,0	10,0	24,1	5,2	1 310
	Ouest	7,08	6 370	7,3	27,7	7,8	19,1	1,9	1 210
	Nord	7,23	7 400	6,7	26,3	8,5	20,9	3,5	1 110
	Est	7,26	6 530	10,7	28,5	10,3	24,5	3,9	990
2	Sud	6,76	7 200	20,8	20,8	8,5	36,5	6,9	590
	Ouest	6,80	7 930	13,0	19,9	9,1	27,3	2,5	2 350
	Nord	6,93	7 260	16,0	19,5	7,8	29,6	3,0	1 380
	Est	7,12	7 040	41,5	25,8	4,8	41,9	4,1	1 360
F orientation		5,85**	0,60	2,62	0,75	1,75	6,03**	1,26	2,28
F arbres		7,79*	4,91*	9,43**	5,30*	9,48**	32,3**	0,11	1,21
F interaction		0,70	1,42	1,86	0,15	6,34**	0,41	0,10	2,68

* Significatif au seuil de 5 p. 100.

** Significatif au seuil de 1 p. 100.

tement significative aux différences d'orientation : les secteurs sud et ouest du tronc ont un pH plus faible que les secteurs nord et est ; les secteurs sud et est sont beaucoup plus riches en azote que les secteurs nord et ouest (fig. 3).

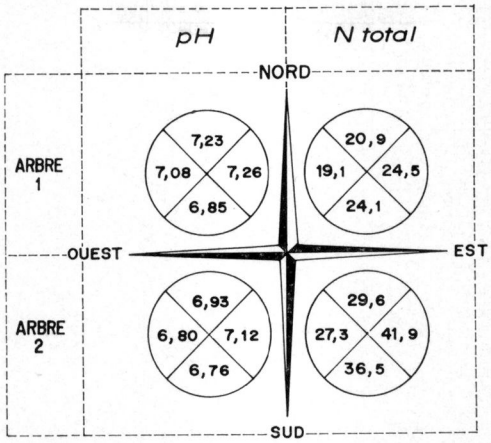


FIG. 3. — *Influence de l'orientation sur la composition de la sève*

Pour expliquer ces différences dues à l'orientation, on peut supposer que la température du tronc, liée à l'ensoleillement, intervient en activant certains processus métaboliques, notamment au niveau de la mobilisation des réserves azotées. Le fait que les vaisseaux du xylème aient, dans un secteur donné du tronc, leur origine dans un groupe de racines déterminé pourrait également intervenir.

c) *Évolution diurne.*

Nous avons déjà signalé qu'il existait une variation diurne dans la tension de la sève, liée aux variations de température. On peut alors se demander si la composition de la sève extraite est susceptible de varier en fonction de l'heure de prélèvement. Pour préciser ce point, nous avons effectué une série de prélèvements sur un même pommier « Golden », dans la même journée, depuis le moment où l'on a pu extraire de la sève (10 h 15) jusqu'au moment où le prélèvement est devenu impossible (19 h). Le tableau 7 rend compte des résultats de cet essai : dans ce cas, il n'y a pas de diffé-

TABLEAU 7

Évolution diurne de la composition de la sève

Moyennes	pH	Résistiv. (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Sucres réduct. (mg/l)	Sucres totaux (mg/l)	Carbone (mg/l)
Matin										
10 h 15-14 h 30	6,63	6 600	8,2	31,3	11	13,6	3,6	50,2	87,8	1 240
Soir										
16 h 10-19 h	6,60	6 840	8,2	39,1	11	14,3	4,1	55,8	102,2	1 220
F	0,03	0,05	0	0,70	0	0,05	0,24	0,14	0,48	0,03

Chaque valeur correspond à la moyenne de 5 déterminations.

TABLEAU 8

Évolution de la composition de la sève pendant la saison de prélèvement

	Dates (1971)	pH	Résistivité (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Sucres réduct. (mg/l)	Sucres totaux (mg/l)	Carbone (mg/l)
« Golden Delicious »	16-19/3	6,93	7 150	17,0	26,0	12,7	54,9	7,7	31,7	75,3	1 555
	22-25/3	7,31	5 920	26,0	38,4	7,0	61,0	16,2	30,2	85,3	1 484
	26-31/3	7,33	3 550	39,1	45,4	4,0	85,3	21,8	30,9	68,8	1 327
	1- 6/4	6,06	2 630	73,0	68,6	6,8	118,5	47,5	24,5	81,5	695
Richared	16-19/3	6,79	5 560	22,0	43,8	10,0	57,0	24,5	33,6	95,7	2 260
	22-25/3	7,46	4 970	36,3	35,5	5,3	69,6	13,7	50,7	122,7	826
	26-31/3	7,89	3 560	55,0	40,8	3,0	97,2	19,0	47,3	105,0	670
	1- 6/4	6,30	3 360	62,6	44,1	4,8	104,7	16,3	34,7	100,5	1 515
F dates		20,29**	20,53**	22,95**	4,50*	10,62**	15,37*	5,22*	1,76	0,63	3,19*
F arbres		0,09	2,63	2,72	0,58	4,19	0,57	2,03	11,25**	9,04**	0,01
F interaction		0,26	1,54	1,23	3,46*	0,25	0,65	8,09**	1,24	0,36	3,73*

Chaque valeur correspond à la moyenne des 4 échantillons prélevés quotidiennement pendant la période indiquée.
* Significatif au seuil de 5 p. 100.
** Significatif au seuil de 1 p. 100.

rence significative, quelle que soit la détermination, entre la composition de la sève avant et après 15 h.

d) *Évolution de la composition de la sève pendant la saison de prélèvement.*

La période pendant laquelle le prélèvement direct de sève est possible s'étale sur près d'un mois. L'activité physiologique de l'arbre à cette époque est très intense puisqu'elle correspond à une reprise de végétation. On peut alors se demander si, au cours de cette période, la composition de la sève n'évolue pas d'une façon systématique. Afin de vérifier ce point, nous avons prélevé de la sève quotidiennement sur deux arbres voisins dans un même verger. Les deux arbres choisis étaient un « Golden Delicious » et un « Richared ». La période de prélèvement (16 mars au 6 avril) a été subdivisée en 4 sous-périodes, que l'on assimile pour l'interprétation à quatre traitements pour déceler l'effet « date ». Dans chacune de ces sous-périodes, quatre prélèvements quotidiens successifs correspondent aux quatre répétitions attribuées à cette sous-période (nous supposons que l'évolution de la sève est lente et que la variation en quatre jours est négligeable par rapport à l'évolution générale sur toute la période de prélèvement). On remarque (tabl. 8) que l'effet « date » est significatif pour les teneurs en Ca, N, P, C, et hautement significatif pour le pH, la résistivité et les teneurs en K et Mg. Si les sucres réducteurs et totaux restent stables, on constate (fig. 4) que le pH passe par un maximum au-dessus de la neutralité, pour devenir franchement acide en fin de période. Pour le phosphore total, l'azote total, le potassium et le calcium, il y a augmentation régulière des teneurs, tandis que les concentrations en carbone et magnésium diminuent.

e) *Différence de composition de la sève du tronc au-dessus et au-dessous du plan de greffe.*

Pour mettre en évidence d'éventuelles différences de ce type, deux séries simultanées de cinq prélèvements chacune ont été réalisées sur le même arbre, avec un intervalle d'une heure entre les prélèvements. La première série correspondait à des

TABLEAU 9

Différences de composition de la sève entre les prélèvements au-dessus et au-dessous du plan de greffe d'un même arbre

	pH	Résistiv. (Ω/cm)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Sucres réduct.	Sucres totaux	Carbone (mg/l)
Valeurs moyennes au-dessus du plan de greffe.....	6,81	3 890	66,7	14,7	32,7	61,0	1 440
Valeurs moyennes au-dessous du plan de greffe..	6,67	3 450	63,5	23,3	56,9	104,8	620
F calculé	0,79	9,59*	0,14	0,58	30,34**	4,54	7,56*

Chaque valeur correspond à la moyenne de 5 déterminations.
* Significatif au seuil de 5 p. 100.
** Significatif au seuil de 1 p. 100.

prélèvements dans le tronc à 40 cm au-dessus du sol, l'autre série à des prélèvements dans la partie souterraine de l'arbre située sur une même génératrice, à environ 20 cm au-dessous du plan de greffe (correspondant d'ailleurs au niveau du sol). Les trocards restaient aux mêmes endroits pendant toute la durée des prélèvements. On constate (tabl. 9) qu'il existe des variations significatives entre ces niveaux de prélèvements pour la résistivité, la teneur en carbone et la teneur en sucres réducteurs. De telles variations peuvent provenir de différences entre le métabolisme du porte-greffe et celui du sujet. Il serait à ce propos intéressant de déterminer s'il existe une modification brutale de la composition de la sève au niveau du plan de greffe, ou si ces variations s'effectuent progressivement.

5. *Conclusions relatives à la méthodologie.*

L'ensemble des résultats acquis permet de dégager les directives générales concernant le prélèvement de sève afin que l'échantillon recueilli soit bien défini.

a) En ce qui concerne l'époque du prélèvement, il importe surtout qu'à l'intérieur de la période favorable, une série de prélèvements correspondant à une étude particulière ne s'étale pas sur plus de trois ou quatre jours, en raison de l'évolution de la composition de la sève au cours de la saison.

b) Dans la même journée, bien qu'il ne semble pas exister de variations significatives dans la composition de la sève, il est prudent de grouper les prélèvements vers le milieu de la journée (entre 10 et 16 heures).

c) Bien que la profondeur du prélèvement n'ait pas d'influence significative sur la composition moyenne de la sève, il semble que pour certains éléments (calcium, phosphore), elle tende à modifier les teneurs. Il paraît donc préférable de normaliser approximativement la profondeur de prélèvement (1 à 2 cm).

d) Étant donné l'influence significative du secteur de l'arbre concerné par le prélèvement, il est indispensable de récolter simultanément autour de l'arbre plusieurs prélèvements permettant de constituer un seul échantillon représentatif.

e) Il est important de ne prélever que sur le tronc, en raison de la plus grande variabilité de composition dans les charpentières, mais également en raison des facilités de prélèvement ; en effet, la tension de sève est d'autant moins forte que l'on est proche de la zone d'absorption de l'eau, c'est-à-dire des racines.

B. — *Premiers résultats sur les relations entre la composition de la sève de printemps et la physiologie de l'arbre fruitier*

1. *Influence de la variété.*

L'évolution de la composition de la sève pendant la période de prélèvement ayant été étudiée en même temps sur un pommier « Golden » et sur un pommier « Richared », il a été possible d'étudier l'influence de la variété ; les deux arbres, voisins, de même âge, de même porte-greffe, se trouvaient dans des conditions identiques de milieu et les prélèvements quotidiens de sève étaient réalisés simultanément sur les deux arbres (tabl. 8).

Les teneurs en sucres réducteurs et sucres totaux des deux variétés sont différentes ; en outre, l'évolution dans le temps des taux de Ca, P et C n'est pas la même dans les deux cas (fig. 4).

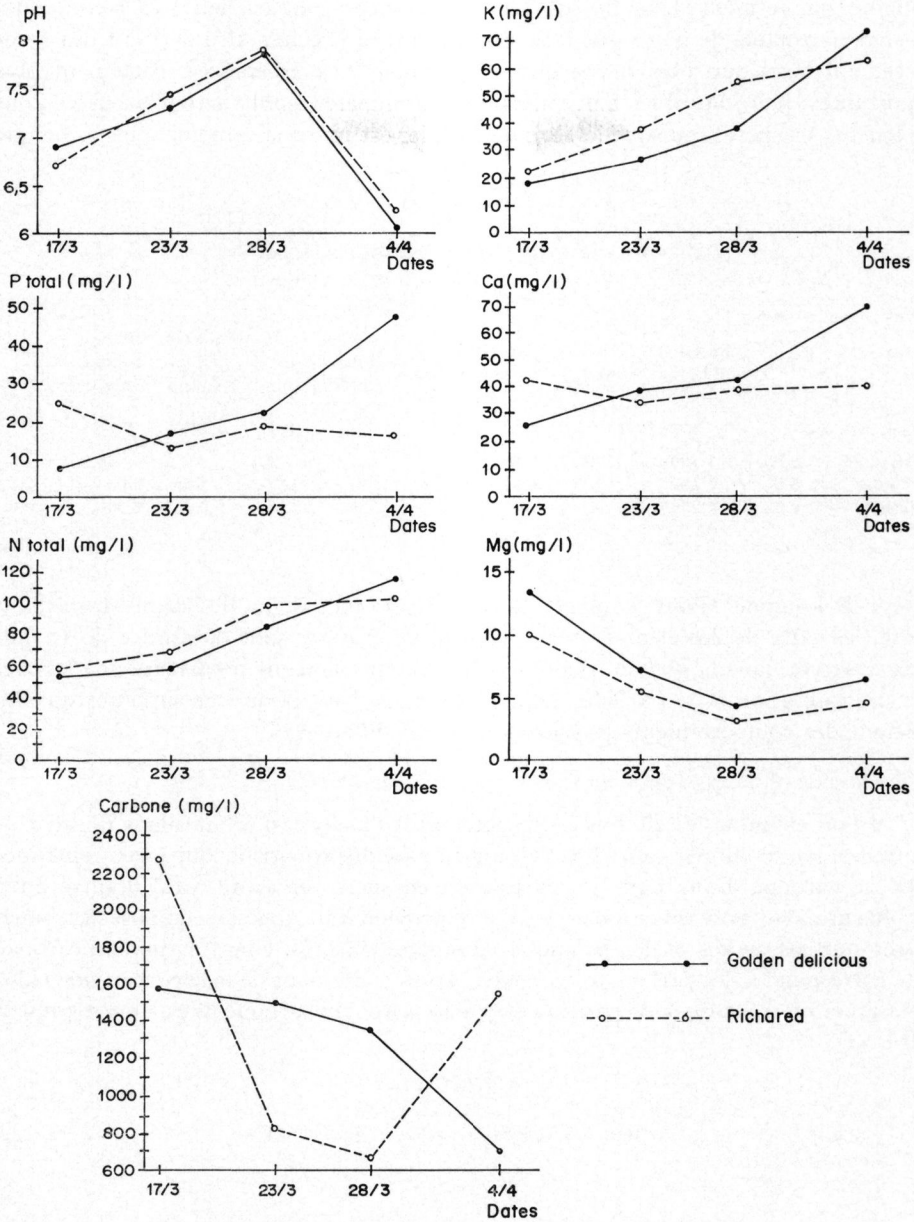


FIG. 4. — *Évolution dans le temps de la composition de la sève*

2. *Influence de l'espèce.*

En plus des légères différences intervariétales de composition de la sève, nous avons pu mettre en évidence de profondes différences interspécifiques.

Le tableau 10 donne les compositions de sève pour trois espèces fruitières (Pêcher, Pommier, Prunier) ; les arbres avaient le même âge, ils étaient situés dans le même

domaine, sur le même type de sol. Les prélèvements ont eu lieu à la même date. Il est remarquable de noter que les espèces à noyau (Pêcher, Prunier) ont des sèves en général beaucoup plus riches que le Pommier. Les différences, nettement plus importantes que celles dues aux variations saisonnières, sont surtout accusées pour les teneurs en sucres, puisque la sève de Prunier est presque cent fois plus riche que

TABLEAU 10

Différences spécifiques de la composition de la sève

	pH	Résistiv. (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Sucres réduct. (mg/l)	Sucres totaux (mg/l)	Carbone (mg/l)
Pommier	6,93	7 150	17,0	26,0	12,7	54,9	7,7	31,7	75,3	1 555
Prunier	5,50	1 120	142	325	37	394	112	2 230	5 650	—
Pêcher	6,35	1 230	210	68	27	325	58	1 020	1 936	6 440

la sève de Pommier. Pour ce qui est du calcium, du potassium, de l'azote et du phosphore, les taux de ces éléments dans la sève de Prunier sont de l'ordre de 10 fois ceux observés dans la sève de Pommier. Il est naturellement prématuré de chercher une interprétation à de pareilles différences, mais il est permis de supposer qu'elles reflètent des comportements physiologiques très différents.

3. *Remarques à propos des composés organiques de la sève.*

Si l'on examine les chiffres correspondant à l'analyse d'échantillons de sève de printemps du Pommier, on peut s'étonner de la disproportion qui existe entre les taux de carbone d'une part, et les teneurs en sucres et azote total d'autre part. La plus grande partie du carbone de la sève proviendrait donc de composés carbonés autres que les sucres et les composés organiques azotés. Une fraction du carbone dosé correspond à des carbonates : en effet, après traitement de la sève à l'acide chlorhydrique, on constate la disparition de 7 à 20 p. 100 du carbone initialement présent (tabl. 11).

TABLEAU 11

Bilan des composés carbonés dans la sève

	1	2	3	4	5
Azote total : N mg/l..	18,3	29	20,4	68,3	22
Sucres totaux :					
Glucose en mg/l	44,2	96,6	118	112,8	119,7
Carbone : C mg/l.....	1 960	2 900	2 040	2 920	2 200
Carbone après décarbonatation : C mg/l ...	1 826	2 706	1 806	2 406	1 966

Si l'on suppose pour simplifier que tout l'azote est sous forme d'acides aminés (dosant 33 p. 100 de carbone) et tous les sucres sous forme de glucose (dosant 40 p. 100 de carbone), on constate que ces composés ne correspondent qu'à 5 à 10 p. 100 du carbone de la sève. Il y a donc 70 p. 100 du carbone présent dans la sève à cette époque qui proviennent de composés organiques autres que les sucres et les acides aminés. Il est probable qu'il s'agit surtout d'acides organiques. Chez les arbres à noyaux, la proportion de sucres dans la sève paraît plus importante.

L'intérêt de l'étude des formes de l'azote — et notamment de la fraction aminée-amidée chez le Pommier — a déjà été signalé (HILL COTTINGHAM, 1970). Différents essais ne nous ont jamais permis de mettre des nitrates en évidence dans la sève ; cela est en accord avec les travaux de THOMAS (1927) et BOLLARD (1953) et confirme le fait que chez le Pommier, les nitrates sont entièrement réduits dès leur entrée dans les radicelles. Afin de préciser les formes de circulation de l'azote pendant la période d'étude, nous avons procédé à l'analyse qualitative et quantitative de l'ammonium et des acides aminés et amidés. Les analyses ont été effectuées avec un analyseur automatique Technicon, en opérant directement, sans hydrolyse préalable, sur des échantillons de sève prélevés le même jour sur des arbres voisins (tabl. 12).

TABLEAU 12

Composés azotés : nature et teneur dans la sève de pommiers

	1		2		3		4	
	µmole/l	mg N/l	µmole/l	mg N/l	µmole/l	mg N/l	µmole/l	mg N/l
NH_4^+	115,–	1,61	100,–	1,40	144,–	2,02	137,–	1,92
Asparagine	113,3	3,17	92,5	2,59	75,0	2,10	62,0	1,74
Acide aspartique	16,6	0,23	61,0	0,85	20,0	0,28	32,5	0,46
Thréonine	8,3	0,12	28,0	0,39	10,0	0,14	20,0	0,28
Glutamine	40,–	1,12	36,6	1,02	40,8	1,14	25,0	0,70
Arginine	8,3	0,46	4,2	0,24	9,2	0,52	5,0	0,28
Acide glutamique	5,8	0,08	8,3	0,12	5,8	0,08	5,0	0,07
Sérine	6,7	0,09	7,5	0,11	5,0	0,07	5,0	0,07
Valine	3,3	0,05	3,3	0,05	3,3	0,05	5,8	0,08
Isoleucine	2,5	0,04	2,5	0,04	2,5	0,04	3,3	0,05
Histidine	0,5	0,02	1,7	0,07	0,8	0,03	0,8	0,03
Lysine	+		+		+		+	
Ornithine	+		+		+		+	
Phénylalanine	+		+		+		+	
Tyrosine	+		+		+		+	
Proline	+		+		+		+	
Acide cystéique	+		+		+		+	
Leucine	+		+		+		+	
Azote ammoniacal aminé et amidé (mg/l)	6,99		6,88		6,47		5,68	

Azote total : intervalle de confiance calculé sur 33 échantillons prélevés à la même date, en mgN/l : 21,6 — 29,7.

\+ : Présence de traces non dosables.

On peut remarquer que, si l'on trouve de nombreux acides aminés, la plupart sont présents en très faible quantité. La figure 5 donne la répartition de la fraction ammoniacale, aminée et amidée, dans laquelle l'ammonium, l'asparagine, la gluta-

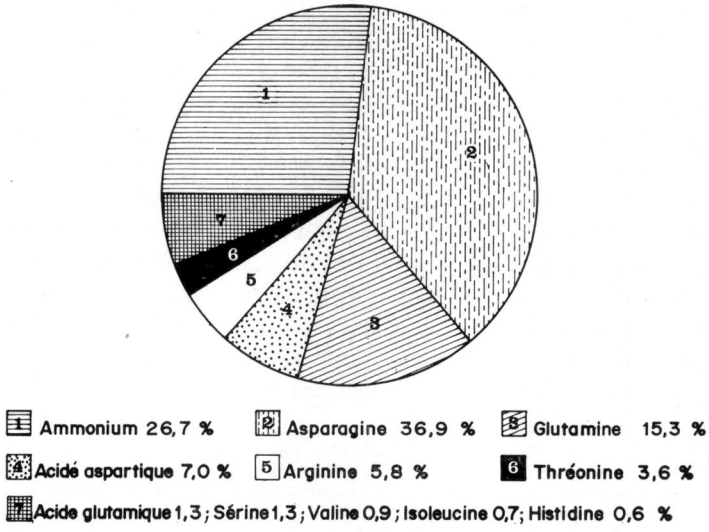


FIG. 5. — *Composition moyenne de la fraction ammoniacale, aminée, amidée*

mine et l'acide aspartique représentent plus de 85 p. 100 de l'azote. On constate que cet azote — sous forme ammoniacale, aminée et amidée — représente seulement 25 à 30 p. 100 de l'azote total.

En résumé, on peut donner de la fraction azotée de la sève de pommier « Golden » la répartition schématique suivante :

fraction azotée de la sève de printemps
- ammonium ..... 10 p. 100
- acides aminés, amidés..... 20 p. 100
- protéines ou peptides ..... 70 p. 100

4. *Influence de l'alternance sur la composition de la sève.*

Dans les paragraphes précédents, nous avons essayé de préciser l'influence des techniques de prélèvement sur la composition de la sève ; à propos d'un essai (tabl. 5 et 6), nous avons passé sous silence l'origine des variations significatives apparaissant entre deux arbres voisins. Dans cet essai, nous avons trouvé des différences significatives pour le pH, la résistivité, les teneurs en potassium, calcium, magnésium et azote total. Or, l'arbre 1 et l'arbre 2 diffèrent par l'intensité de l'alternance qu'ils extériorisent et par leur productivité moyenne (tabl. 13).

Le coefficient de régularité (CR_4) correspond au quotient de la somme des faibles récoltes (1969-1971) par la somme des fortes récoltes (1968-1970). Ce coefficient, voisin de 1 dans le cas d'un arbre donnant des récoltes constantes ou régulièrement croissantes, devient d'autant plus petit que l'alternance de l'arbre est plus marquée.

A partir de cette observation, nous avons cherché à préciser la nature de ce phé-

nomène. Dans ce but, des échantillons de sève ont été prélevés et analysés, deux années années de suite, sur 40 pommiers « Golden » d'un verger caractérisé par une forte alternance globale avec cependant, suivant les individus, des niveaux d'alternance plus ou moins intense. Connaissant pour chaque arbre les poids de récolte pour les années 1969, 1970, 1971, 1972 et ayant calculé les coefficients individuels de régularité (CR_4), nous avons retenu les 10 arbres les plus alternants, d'un coefficient moyen de régularité de 0,31 sur 4 ans, et les 10 arbres les plus réguliers, d'un CR_4 moyen de 0,64.

TABLEAU 13

Différence d'intensité d'alternance sur deux arbres

Arbre n°	Récoltes annuelles (kg/arbre)				Récoltes cumulées (kg/arbre)	Coefficient de régularité CR_4
	1968	1969	1970	1971		
1	247	41	375	115	778	0,25
2	78	53	163	150	444	0,84

Pour ces deux groupes de 10 arbres, nous avons comparé la composition de la sève entre une année de forte production (1970) et une année de faible production (1971) (tabl. 14). Les conditions météorologiques des mois de mars 1970 et 1971 ayant été absolument comparables à Bordeaux, la pleine floraison a eu lieu à la même date pour ces deux années. Ainsi, on peut éliminer le facteur climatique au moment du prélèvement comme source de variation de la composition de la sève entre ces deux années consécutives. Tous les autres facteurs étant égaux par ailleurs, il semble logique de relier les modifications de composition de sève pour un même arbre, entre 1970 et 1971, à son état d'alternance.

Les prélèvements ont été réalisés en respectant les directives que la partie méthologique de notre travail avait permis de définir et ont eu lieu une quinzaine de jours avant la date de pleine floraison.

Globalement, la sève est beaucoup moins riche en 1970, année de très forte production, donc de très forte floraison.

Comparons maintenant les deux groupes :

Arbres fortement alternants. —Pour les arbres fortement alternants (CR_4 moyen de 0,31), la récolte 1971 correspond approximativement au 1/3 de la récolte 1970 et les teneurs en potassium, azote et carbone de 1971 sont au moins le triple des teneurs de 1970. Schématiquement, les teneurs sont inversement proportionnelles à la charge de l'arbre. Pour le calcium et le phosphore total, si la variation est dans le même sens, l'augmentation relative est moins accusée mais toujours significative. Quant à la résistivité, elle est plus faible en 1971 qu'en 1970, ce qui naturellement traduit l'enrichissement de la sève.

Arbres moins alternants. — Pour les arbres moins alternants (CR_4 moyen de 0,64), seules restent significatives les variations concernant le potassium, l'azote

TABLEAU 14

*Composition moyenne de la sève pour les **10** arbres les plus alternants* ($CR_4 = 0{,}31$) *et les **10** arbres les plus réguliers* ($CR_4 = 0{,}64$)

CR_4		Récoltes (kg/arbre)	pH	Résistivité (Ω/cm)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	N total (mg/l)	P total (mg/l)	Sucres réduct. (mg/l)	Sucres totaux (mg/l)	Carbone (mg/l)
0,31	1970	312	6,59	5 590	12,6	25,0	10,4	21,6	14,9	33,9	82,6	685
	F	62,96**	0,0	4,75*	45,88**	9,86**	3,08	56,81**	6,02*	0,95	0,01	203,74**
	1971	118	6,59	4 330	39,3	40,5	8,2	70,2	25,9	45,4	83,8	2 513
0,64	1970	224	6,60	4 520	16,8	27,7	9,9	31,3	20,4	40,3	94,6	859
	F	27,43**	0,98	0,10	22,0	2,60	1,01	23,08**	0,04	0,02	0,94	312,91**
	1971	139	6,39	4 700	41,5	35,7	8,9	64,6	19,5	41,8	79,1	2 432

* Significatif au seuil de 5 p. 100.
** Significatif au seuil de 1 p. 100.

et le carbone, pour lesquels la sève est toujours plus riche en 1971, année de faible charge, mais l'enrichissement relatif est beaucoup moins marqué que dans le cas des arbres très alternants.

Ainsi, chez ces pommiers alternants, la composition de la sève est très significativement différente suivant que l'on se trouve en année de forte ou de faible charge ; cette différence est d'autant plus grande que l'alternance est plus marquée. Les teneurs en carbone, en potassium et en azote total, qui correspondent à des composés et à un élément particulièrement mobiles, sont les plus sensibles à l'état d'alternance.
Par contre, le calcium, le phosphore total et la résistivité ne varient significativement d'une année à l'autre que dans le cas d'arbres très alternants.

Dans les conditions de notre essai, tout se passe donc comme si *la sève prélevée 15 jours avant la floraison des pommiers était d'autant moins riche que le nombre de bourgeons floraux est plus important, et ceci pour les éléments suivants : C, K, N et Ca.*

Si l'on veut interpréter ce résultat, plusieurs points doivent être précisés. Tout d'abord, les éléments circulant dans la sève au moment du prélèvement peuvent provenir : soit d'une absorption récente par les racines, soit d'une mobilisation des réserves accumulées l'année précédente dans le parenchyme ligneux. Seuls, les composés carbonés proviennent avec certitude des réserves, puisqu'il n'y a pas encore de synthèse chlorophyllienne (ce dernier point n'est que partiellement vrai, car l'absorption par les racines du CO_2 ou même de composés organiques à faible poids moléculaire est un fait admis. Cependant, on peut supposer que l'apport de carbone par cette voie est négligeable devant la masse des réserves carbonées mobilisées pendant la période considérée).

Il faut également rappeler que les bourgeons en croissance sont, à cette période, des pôles de consommation intense ; de plus, si les bourgeons à bois et les bourgeons à fleurs ont des teneurs voisines pour les différents éléments, les bourgeons à fleurs sont plus précoces (environ une semaine) et deux à quatre fois plus gros que les bourgeons à bois (Mme HUGUET, 1963 ; GOUNY et Mme HUGUET, 1964). Pour un arbre, les besoins seront donc d'autant plus élevés qu'il y a davantage de bourgeons à fleurs.

En outre, la teneur de la sève en un élément donné, à un instant donné, traduit en fait la différence qu'il y a entre la consommation des organes en croissance et les disponibilités en cet élément. La teneur dépend donc des intensités relatives de la fourniture et des besoins.

L'appauvrissement de la sève des arbres fortement chargés peut alors s'interpréter comme la conséquence d'une consommation instantanée augmentant avec le nombre de bourgeons floraux.

L'étude de l'évolution de la sève au cours d'un printemps permet de vérifier cette hypothèse. En 1970, dans les deux groupes de pommiers qui nous ont servi à mettre en évidence la relation « alternance-composition de la sève », les prélèvements ont été répétés à deux dates, 12 et 25 mars, sur les mêmes arbres. Les résultats des analyses correspondantes figurent au tableau 15.

Nous n'avons tenu compte que des éléments sur la teneur desquels l'effet de l'alternance avait été mis en évidence dans l'essai précédent. En l'espace de 13 jours, les teneurs en carbone ont baissé de moitié dans les deux groupes d'arbres ; pour le potassium et l'azote, les teneurs ont augmenté très significativement, tandis qu'elles sont restées très stables pour le calcium.

TABLEAU 15

Évolution à court terme (13 jours) *de la composition de la sève de pommiers « Golden » suivant l'intensité de leur alternance*

Dates	CR_4	Carbone (mg/l)	Azote total (mg/l)	Potassium (mg/l)	Calcium (mg/l)	Récolte (kg/arbre)
12-3-1970	0,31	1 360	9,4	5,8	24,2	312
25-3-1970		685	21,6	12,6	25,0	
12-3-1970	0,64	1 821	10,7	6,0	22,1	224
25-3-1970		859	31,3	16,8	27,7	
F dates		49,78**	38,42**	41,15**	0,89	
F intensité d'alternance		8,63**	4,28*	2,55	0,01	
F interaction		0,46	2,50	2,26	0,50	

Nota : chaque valeur correspond à la moyenne de 10 déterminations.

D'autre part, on remarque à nouveau que les valeurs absolues des teneurs sont en raison inverse de la charge en fleurs. Suivant les éléments, l'évolution des teneurs moyennes permet de distinguer deux comportements différents :

— pour la teneur en carbone, dont le niveau dépend de l'intensité des besoins et de la mobilisation des réserves, on constate une baisse, ce qui traduit : soit un épuisement progressif de ces réserves, soit une diminution de leur mobilisation, soit encore une accélération de leur utilisation ;

— pour l'azote et le potassium, dont les comportements sont remarquablement comparables, on constate qu'il y a enrichissement très significatif, mais que celui-ci est significativement beaucoup plus accusé dans les arbres peu chargés. On peut supposer que l'absorption augmente progressivement à mesure que le sol se réchauffe. Indépendamment de l'état d'alternance de l'arbre, l'azote et le potassium vont entrer dans les racines avec d'autant plus d'intensité que la saison s'avance. A la fin de cette période d'activité, les teneurs en azote et en potassium devraient tendre vers celles observées dans la sève pendant la pleine saison végétative. Cette hypothèse est en accord avec les résultats de BOLLARD (1953) qui, avec une autre méthode de prélèvement, a suivi les variations de composition de la sève de pommier pendant toute une année.

On peut supposer alors que l'absorption racinaire des arbres est à cette époque indépendante du nombre de bourgeons floraux et dépend seulement de la température du sol et de la disponibilité en eau. Cette hypothèse paraît très plausible puisqu'au point de vue vigueur et dimensions, rien ne distingue les arbres très alternants des arbres plus réguliers.

Les arbres très chargés en bourgeons floraux ayant une consommation d'azote et de potassium supérieure à celle des arbres moins chargés, leur sève est alors

moins concentrée et leurs teneurs en ces éléments augmentent moins rapidement.

Quant aux teneurs en calcium, elles sont les mêmes pour les deux groupes d'arbres et remarquablement stables dans l'intervalle de temps considéré. On peut supposer que, pour cet élément peu mobile, les besoins des arbres très chargés ne se différencient pas suffisamment de ceux des arbres moins chargés, dans l'intervalle d'étude, pour se traduire par des différences de teneurs.

IV. — CONCLUSIONS

Cette étude de la sève de printemps des arbres fruitiers a d'abord permis de définir une méthodologie propre à cette technique nouvelle sur laquelle il n'existe, à notre connaissance, pas de référence. Elle a également mis en lumière quelques points susceptibes de compléter la connaissance de la physiologie des arbres fruitiers, notamment le fait que la composition de la sève de Pommier prélevée dans le tronc semble en relation avec l'état d'alternance de l'arbre et, plus précisément, l'intensité de la floraison proche. La sève prélevée 15 jours avant la floraison a des teneurs en C, K, N et Ca d'autant plus faibles que le nombre de boutons floraux est plus important. L'étude ayant porté sur deux années de mêmes conditions météorologiques en mars, il faudrait également étudier les variations éventuelles de composition de la sève d'une année à l'autre, pour des arbres non alternants, dans des conditions météorologiques variables.

On pourrait alors tirer de ces observations une application pratique de l'analyse de la sève de printemps. En effet, on remédie très efficacement à l'alternance d'un arbre par une taille et un éclaircissage judicieux. C'est là qu'interviennent le coup d'œil et le savoir-faire du praticien. Si l'on veut dépasser l'empirisme de l'homme de l'art, le problème est justement de déterminer l'intensité pratique de ces deux opérations en fonction du comportement antérieur de l'arbre. Or, si la composition de la sève de printemps dépend essentiellement du nombre de bourgeons floraux, la comparaison de la composition d'un prélèvement de printemps, quelque temps après le début de la montée de sève, avec celle de l'année précédente, permettrait de juger objectivement si la taille d'hiver a été suffisante et de prévoir l'intensité de l'éclaircissage à réaliser. On pourrait également utiliser l'importance relative de l'enrichissement entre deux prélèvements successifs de la même année. On établirait ainsi un test d'efficacité de la taille, en même temps qu'un pronostic d'intensité pour l'éclaircissage.

Par ailleurs, dans la mesure où la composition de la sève au printemps reflèterait, pour certains éléments, l'intensité de l'absorption racinaire, on disposerait alors d'un moyen privilégié d'apprécier celle-ci.

En conclusion, il semble bien que l'étude de la sève de printemps des arbres fruitiers se révèle à la fois une méthode efficace d'exploration physiologique et un moyen pour résoudre certains problèmes pratiques de l'arboriculture.

Reçu pour publication en mars 1973.

REMERCIEMENTS

Nous adressons tous nos remerciements à Mlle Nicole Poitou, Station de Recherches sur les Champignons du Centre de Recherches de Bordeaux, qui a bien voulu se charger des analyses d'acides aminés.

SUMMARY

STUDY OF FACTORS MODIFYING THE COMPOSITION OF SRING SAP OF FRUIT-TREES

The composition of sap extracted from the wood of fruit-trees, at the beginning of spring, varies according to :

a) sampling conditions (date, time, depth within the tree, height and orientation on the trunk) ;

b) variety, species, intensity of biennial bearing in « Golden Delicious » apple-trees.

Analysis of the sap could permit the effectiveness of pruning to be controlled and the necessary intensity of thinning to be gauged, in order to limit the effects of biennial bearing habit.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER FATKOREN, DIE DIE ZUSAMMENSETZUNG DES FRÜHLINGSSAFTS DER OBSTBÄUBE VERÄNDERN

Die Zusammensetzung des im Frühling del Holz von Obstbäumen entnommenen Safts ist verschieden je nach :

a) den Entnahmebedingungen (Tag, Stunde, Tiefe im Baum, Höhe und Lage am Stamm),

b) der Sorte, Art und der Stärke der Alternanz beim « Golden Delicious » Apfelbaum.

Die Saftanalyse könnte dazu dienen, die Wirksamkeit des Schnitte zur überprüfen und das Ausmass des für die Milderung der Auswirkungen der Alternanz notwendigen Auslichtens vorauszubestimmen.

РЕЗЮМЕ

Ж. Г. ХЮГЕ.

Изучение факторов изменяющих состав весеннего сока фруктовых деревьев.

Состав сока фруктовых деревьев изменяется весной :

а) в зависимости от условий его сбора (даты, часа, глубины в дереве, высоты и ориентации на стволе);

б) в зависимости от сорта, вида и интенсивности чередования направлений у яблони сорта Гольден Делишес.

Анализ сока может позволить осуществить контроль эффективности обрезки и предвидеть интенсивность освещения необходимого для ограничения эффекта чередования.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOLLARD E. G., 1953. The use of tracheal sap in the study of apple-tree nutrition. *J. Exper. Bot.*, **4**, 363-368.

DELAS J., 1964. Spectrophotométrie de flamme en milieu oxine. Application au dosage du calcium et du magnésium dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **15**, 633-649.

GOUNY P., HUGUET C., 1964. Évolution biochimique des bourgeons de poiriers avant et pendant la période de floraison. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **50**, 391-399.

HELLER R., 1969. *Biologie végétale.* Vol. 2 « Nutrition et métabolisme », 270-280. Masson et Cie, Paris.

HILL-COTTINGHAM D. G., 1970. Distribution and identity of the nitrogen constituents of apple-trees. *J. Sci. Food Agric.*, **21**, 4.

HUGUET C., 1963. Quelques données récentes en matière de nutrition des arbres fruitiers. *C. R. 94e Congrès Pomol.*, Bordeaux, 75-98.

HUGUET J.-G., SAVE V., 1969. Nouvelle méthode de prélèvement de la sève de *Prunus domestica*. *C. R. Acad. Sc.*, Paris, **268**, 668-671.

MARAIS J.-P. *et al.*, 1965. A critical examination of the Nelson-Somogyi method for the determination of reducing sugars. *Anal. Biochim.*, **15**, 373-381.

ROUTCHENKO W., 1967. Appréciation des conditions de la nutrition minérale des plantes basée sur l'analyse des sucs extraits des tissus conducteurs. *Ann. agron.*, **18**, 361-402.

SOMOGYI M., 1952. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.*, **195**, 19.

TABATABAI M. A., BREMMER J. M., 1970. Use of the Leco automatic 70-second carbon analyzer for total carbon analysis of soils. *Soil Sci. Amer. Proc.*, **34**, 608-610.

THOMAS J., 1927. The scale of formation of amino-acids. *Science*, **66**.

Ann. agron., 1973, **24** (4), 503-505.

CHRONIQUE DES LIVRES

HILLEL (D.), ed. — OPTIMIZING THE SOIL PHYSICAL ENVIRONNEMENT TOWARD GREATER CROP YIELDS. — New York, London, Academic Press, 1972, 240 p.

Cet ouvrage contient les communications présentées par un groupe de travail de spécialistes, sur le thème : « Amélioration de l'environnement physique du sol en vue de meilleurs rendements », à l'occasion du Symposium international sur la Physique et la Technologie du Sol et de l'Eau, qui s'est tenu à la Faculté d'Agriculture de Rehovot, en Israël, en août-septembre 1971.

Les titres en sont les suivants :

— critères pour déterminer l'orientation à donner aux recherches en physique du sol ;
— comment résoudre efficacement les problèmes de l'eau en agriculture ;
— température du sol et développement des plantes ;
— amélioration de la rétention de l'eau dans les sols sableux ;
— amélioration de la structure du sol par des moyens chimiques ;
— développement des racines en relation avec les conditions physiques du sol ;
— l'équilibre hydrique au champ et l'efficacité de l'utilisation de l'eau ;
— contrôle de la salinité du sol ;
— programmation des irrigations en vue d'une plus grande efficacité ;
— contrôle du microclimat lumineux dans les communautés végétales ;
— l'apport d'éléments nutritifs et leur absorption en relation avec les conditions physiques du sol ;
— analyse des paramètres de croissance et de leurs variations dans la recherche de rendements accrus.

DASMANN (R. F.), MILTON (J. P.), FREEMAN (P. H.). — ECOLOGICAL PRINCIPLES FOR ECONOMIC DEVELOPMENT. — Londres, New York, John Wiley and Sons Ltd, 1973, 252 p.

Préparé à la demande de l'« International Union for Conservation of Nature and National Resources » (U. C. N.), Morges (Suisse), et de la « Conservation Foundation », Washington, cet ouvrage a pour but de faire connaître un certain nombre de concepts écologiques indispensables à ceux qui s'occupent de problèmes de développement. Il insiste plus particulièrement sur les écosystèmes qui font habituellement l'objet de programmes de développement : par exemple ceux des forêts tropicales humides et des savanes et prairies dans les régions tropicales, subtropicales et méditerranéennes, ainsi que sur ceux connus pour être spécialement fragiles (régions montagneuses, régions côtières, îles). Il aborde également les problèmes divers posés par les barrages, l'irrigation, le développement du tourisme, etc.

Des références bibliographiques complètent les divers chapitres.

ROUSSEL (L.). — PHOTOLOGIE FORESTIÈRE. — Paris, Masson, 1972, 144 p.

L'ouvrage débute par des indications générales sur les rapports entre le rayonnement solaire et les êtres vivants, tels qu'ils ont été envisagés dans les cosmogonies primitives, puis tels qu'ils sont expliqués par les dernières théories scientifiques ; le champ d'application de la photologie forestière est alors sommairement défini.

Ensuite sont étudiés, classés par catégories, les divers types d'appareils utilisés dans les observations photométriques, spécialement en forêt. Diverses considérations théoriques sont

développées à cette occasion. Les résultats chiffrés obtenus par un certain nombre d'auteurs, sont alors exposés avec quelques détails.

Les effets physiologiques partiels du rayonnement solaire sur les diverses fonctions des végétaux ligneux, tels qu'ils résultent d'études, souvent très précises effectuées récemment, sont alors rappelés (effet photopériodique, germination, croissance, phototropisme, photosynthèse, respiration et transpiration notamment).

Puis, l'auteur aborde l'étude, pratiquement très importante, de l'effet global du rayonnement naturel sur le développment d'un certain nombre d'espèces ligneuses, résineuses et feuillues, en tentant d'expliquer les observations effectuées par l'intervention des divers effets physiologiques partiels, précédemment exposés.

Enfin, et avant une brève conclusion, sont énumérées quelques applications sylvicoles de la photologie forestière, qui montrent que, loin d'être un simple exercice intellectuel, les recherches photologiques débouchent sur des résultats essentiellement pratiques.

LA SCIENCE DU PAYSAGE. — REVUE GÉOGRAPHIQUE DES PYRÉNÉES ET DU SUD-OUEST. — Toulouse, t. 43, nº 2, avril 1972, 144 p.

La revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest réunit, reprend et complète, dans un fascicule spécial, les communications présentées au Colloque interdisciplinaire sur la « Science du paysage et ses applications » organisé en mars 1970 à l'Institut de Géographie de Toulouse-Le Mirail par le « Centre interdisciplinaire de Recherche sur les Milieux physiques et leur Aménagement ». Ces travaux d'écologistes, de géographes ou de pédologues traitent essentiellement des méthodes d'étude intégrée choisies dans des domaines variés du paysage ; mais ils sont étayés par des monographies d'application. L'objet principal de cette publication est d'ouvrir un débat avec tous les responsables de l'aménagement (administrateurs publics et privés, aménageurs, architectes, ingénieurs, paysagistes, urbanistes, etc).

Les titres des communications sont les suivantes :

— G. BERTRAND. — La science du paysage, une science diagonale ;
— F. TAILLEFER. — Le premier colloque interdisciplinaire sur la science du paysage et ses applications. Rapport de synthèse ;
— G. VIERS. — Géographie physique, écologie et géographie zonale ;
— J. HUBSCHMAN. — Sols et paysages : quelques problèmes d'écologie du sol ;
— M. DELPOUX. — Écosystème et paysage ;
— G. BERTRAND. — Les structures naturelles de l'espace géographique. L'exemple des montagnes Cantabriques centrales (nord-ouest de l'Espagne) ;
— G. CANTEGRIL, D. MARTY, S. VIE. — Paysages du Cabardès occidental (Montagne Noire, sud-ouest du Massif central) ;
— J. HUBSCHMAN. — Un domaine privilégié pour l'écologie du sol : le Cabardès.

VUCKS (M. F.), SIDOROVA (A. I.) éd. — WATER IN BIOLOGICAL SYSTEMS. — vol. 3 (traduit du russe). New York. Consultants Bureau, 1971, 82 p.

Ce livre, qui est le troisième d'une série dont le titre est « L'eau dans les systèmes biologiques » fait le point des différentes recherches effectuées sur la nature de l'eau et des solutions aqueuses. Il traite des interactions de l'eau avec les macromolécules et de la structure, de l'état et du rôle de l'eau dans les systèmes biologiques.

Ce volume montre l'intérêt des méthodes spectroscopiques et plus particulièrement de la spectroscopie infrarouge dans l'étude de la structure de l'eau.

Titres des articles présentés dans ce livre

— A. I. SIDOROVA, A. I. KHALOIMOV, A. P. ZHUKOVSKII. — Liaison hydrophobe dans des solutions aqueuses diluées de non électrolytes.
— I. N. KOCHNEV. — Changements dans le spectre proche infrarouge de l'eau sous l'action de non-électrolytes dissous.
— L. V. MOISEEVA, T. G. BRAGINSKAYA. — Recherche de la structure de l'eau et des solutions aqueuses de non-électrolytes à partir de leur spectre infrarouge dans la région des vibrations intermoléculaires.

— B. A. Mikhailov, V. M. Zolotarev, O. P. Girin, N. G. Bakhshiev. — Résolution en ses composantes des bandes d'absorption infrarouge non résolues. Cas de la bande libration-vibration de l'eau liquide.

— G. V. Yukhnevich, A. A. Vetrov, B. P. Shelyukhaev. — Calcul des fréquences de libration et vibration translation de dimères, trimères et pentamères de l'eau.

— I. Z. Fisher. — La structure de l'eau.

— Yu. V. Gurikov. — Variation du nombre de coordination dans l'eau.

— V. V. Puchkov, L. D. Kislovskii. — Rôle possible du réarragement de la configuration électronique des molécules dans la structure de l'eau.

— Yu. P. Syrnikov. — Utilisation de la théorie des graphes pour décrire la structure de l'eau.

— O. F. Bezrukov, B. P. Nikolaev. — Coefficient d'auto-diffusion de l'eau dans des solutions de protéines et des suspensions de caoutchouc.

— M. F. Vuks, L. V. Shurupova. — Diffusion de la lumière et variations locales de concentration dans les systèmes eau-dioxane et eau lourde-dioxane.

— V. I. Elfimov, B. Dzhuraev, M. F. Vuks. — Étude de l'interaction anisotrope des ions CO_3^{--} et NO_3^- avec l'eau à partir des données de diffusion de la lumière.

— T. G. Balicheva, I. V. Pologikh. — État de l'eau dans les complexes moléculaires d'hexaméthylène tétramine avec certains hydrates cristallins de sels inorganiques.

— N. A Vershinskaya, L. I. Perhino, A. I. Sidorova. — Recherche du métabolisme de l'eau des tissus de souris blanches par spectrométrie infrarouge.

— B. N. Grigor 'ev. — État de l'eau dans les matériaux dispersés.

— V. M. Zolotarev. — Constantes optiques de l'eau liquide.

— A. P. Zhukovskii, A. I. Sidorova. — Mécanisme de structuration de l'eau dans des solutions de molécules non polaires.

— I. N. Kochnev, A. I. Sidorova. — Attribution de la bande de valence du spectre de l'eau liquide.

R. P.

Rode (A. A.), Smirnov (V. N.). — Potchvovedenie (Pédologie). — En russe. Moscou École supérieure, 1972, 490 p.

Pour la plupart des lecteurs, le nom du professeur A. A. Rode est généralement associé aux problèmes de l'eau. On lui doit en effet un certain nombre de monographies importantes, dont un ouvrage magistral sorti en 1965 : *Les bases de la connaissance sur l'eau du sol*, traduit depuis en anglais.

C'est oublier que la carrière fertile de ce chercheur a comporté une longue période d'enseignement de la pédologie générale à l'Institut forestier de Briansk (1938-1948). Le présent ouvrage nous rappelle que l'auteur n'a pas délaissé ses préoccupations anciennes. Avec le sous-titre « Manuel pour les Instituts forestiers », A. A. Rode nous présente, en collaboration avec V. M. Smirnov, un livre de Pédologie générale destiné essentiellement à des étudiants. L'exposé est divisé en deux parties.

La première partie, intitulée *Connaissances générales sur le sol* comporte dix chapitres :

1. Altération et pédogenèse ; 2. Morphologie des sols ; 3. Composition granulométrique, minéralogique et chimique ; 4. Matière organique ; 5. Colloïdes du sol — La solution et l'air du sol ; 6. Propriétés physiques du sol ; 7. Régimes thermique, hydrique et de l'air du sol. Rôle hydrologique des plantations forestières ; 8. L'érosion et les méthodes de lutte ; 9. Fertilité du sol et échanges d'éléments minéraux et d'azote entre le sol et la végétation arbustive ; 10. Facteurs et conditions de la pédogenèse ; le processus pédogénétique, distribution géographique des sols.

La deuxième partie, intitulée *Principaux types de sols suivant les zones* est constituée également de dix chapitres :

11. Les sols de la zone de toundra et arctique ; 12. Les sols de la zone forestière ; 13. Les sols de la forêt-steppe ; 14. Les sols de la zone steppique ; 15. Les sols salés, les solonetz, les solods ; 16. Les sols de la zone semi-désertique ; 17. Les sols de la zone désertique ; 18. Les sols forestiers des régions montagneuses du sud de l'U. R. S. S. ; 19. Considérations d'ensemble sur les sols d'U. R. S. S. et problème de leur classification ; 20. Les sols et les types de forêt.

Le livre est écrit dans une langue simple, claire. De nombreux tableaux et figures complètent et illustrent le texte. Un index alphabétique facilite les recherches.

A. F.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* : (250 mots max.) résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *titre et résumé* anglais ou destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.), l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera, en plus, le nom de l'auteur du chapitre cité, les noms des rédacteurs principaux, précédés de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponible est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 12,5 × 19 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité pour les tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 9-1973

Dépôt légal : 3e trimestre 1973. N° d'impression : 1193.

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24. N° 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (5), 507-532.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'EXTINCTION DE L'ÉNERGIE D'ORIGINE SOLAIRE DANS DES PEUPLEMENTS DE BLÉ TENDRE (*TRITICUM AESTIVUM* L. EM. THIELL.)

Ch. BALDY

Station de Bioclimatologie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

RÉSUMÉ

L'étude de l'extinction de l'énergie solaire dans cinq cultivars de Blé tendre de type printemps, et de leur albedo, a été réalisée à Versailles-La Minière en 1970 et 1971, à l'aide de pyranomètres linéaires originaux.

Des variations importantes d'albédo (mesuré entre 0,4 et 3,0 μm) sont dues à la position du soleil, et à l'importance relative du rayonnement diffus dans le global. Mais les cultivars étudiés présentent des albedo significativement différents, et composés à plus de 80 p. 100 par de l'infra-rouge (0,75-3,0 μm).

L'extinction du rayonnement incident dans le couvert est rapide : dès que la surface foliaire dépasse 4 à 5 m^2m^{-2}, l'énergie *visible* résiduelle devient insuffisante la plus grande partie de la journée pour assurer une photosynthèse notable des feuilles au-dessous de ce niveau. Le port des cultivars est important à cet égard : des feuilles supérieures dressées laissent mieux pénétrer la lumière, au milieu de la journée au moins ; inversement ces feuilles dressées interceptent plus efficacement le rayonnement incident le matin et le soir, quand le soleil est bas sur l'horizon.

On propose une méthode de calcul de l'énergie visible, à partir de mesures de l'énergie globale faites dans la végétation, et on calcule le rendement énergétique de cultures de Blé, avant de proposer des voies de recherche susceptibles d'améliorer le rendement global en masse sèche des cultures, tout en soulignant que la seule connaissance des processus de la photosynthèse paraît insuffisante pour expliquer l'évolution *qualitative* des réserves du caryopse.

INTRODUCTION

Cet article fait partie d'une série de cinq. Les quatre autres comportent deux mises au point bibliographiques concernant l'utilisation de l'énergie lumineuse par la photosynthèse (BALDY, 1972, 1973 *a*), et l'enracinement des Blés (BALDY, 1973 *b*),

et deux mémoires originaux qui portent sur les relations mutuelles existant entre organes à chaque instant de la vie du Blé (BALDY, 1973 *c*) et l'assimilation nette des limbes en conditions naturelles (BALDY, 1973 *d*) (1).

La quantité d'énergie transformée en matière sèche varie constamment au cours de la vie du Blé : elle dépend des caractéristiques des *récepteurs* (constitués par les feuilles et les autres organes chlorophylliens), de l'énergie incidente disponible à chaque instant, des caractéristiques de son extinction dans la végétation et de la réponse de chaque élément du peuplement aux conditions de milieu.

La compétition pour la lumière dans un peuplement se traduit par l'*ombrage mutuel* des plantes et de leurs organes : une mise au point bibliographique récente (BALDY, 1973 *a*) a montré que celui-ci induit un affaiblissement continuel de la vitesse de croissance, et une réduction du dévelopement des racines coronales des talles défavorisées.

Le niveau d'énergie et la qualité de la lumière arrivant à chaque organe à chaque instant, commandent non seulement sa propre évolution, mais aussi celle des organes non photosynthétisants qui en dépendent (WARDLAW, 1968). L'énergie lumineuse doit être utilisée à l'instant même : elle ne peut être « emmagasinée » que par l'intermédiaire des pigments photosensibles.

Pendant la phase herbacée qui suit la levée, la culture a généralement un aspect planophile : l'indice de surface foliaire est inférieur à un à la fin de la phase de tallage, et la masse sèche des parties aériennes est faible (moins de 50 g m^{-1}). Cette période dure plusieurs mois chez les Blés d'hiver, un mois environ chez les types printemps. Un redressement apparent des feuilles marque le début de la phase de montaison, et la surface de celles-ci croît rapidement dans le peuplement pendant cette période ; selon les cultivars, le port peut être plus ou moins dressé.

A partir de la floraison, les surfaces chlorophylliennes actives se réduisent rapidement : les talles dominées et les feuilles inférieures disparaissent progressivement ; trois ou quatre semaines *après l'anthèse*, la feuille culmaire, le dernier entre-nœud et l'épi *demeurent seuls actifs*. Leur surface d'interception reste importante, mais le port des plantes devient essentiellement *érectophile*. La phase essentielle de transformation des produits qui migrent vers l'épi et s'y transforment *qualitativement* se situe à cette époque (SZEICZ, 1969 ; VANELDEREN *et al.*, 1972 ; WARDLAW, 1963 ; GESLIN et VERNET, 1952).

Ces informations font ressortir l'ampleur des variations possibles de l'énergie photosynthétiquement active au sein du couvert, et les répercussions qu'elles peuvent avoir pour la croissance. Le présent article tente de *quantifier* ces phénomènes, en s'attachant plus particulièrement aux aspects suivants :

— Évaluation de l'importance et de l'évolution de l'albedo, en fonction de l'âge, de la morphologie de quelques cultivars et du type de temps, en considérant aussi la *composition* de ce rayonnement réfléchi ;

— Caractérisation de l'extinction du rayonnement dans la végétation, en fonction de ces mêmes facteurs ;

— Étude des répercussions que les éléments précédents peuvent avoir sur la croissance des éléments du peuplement.

(1) Cet ensemble constitue les éléments d'une thèse de Docteur-Ingénieur (en Écologie végétale), présentée sous la direction de M. le Professeur LEMÉE à l'Université de Paris-Sud en 1973.

Cette analyse permet d'envisager des voies de recherche qui semblent pouvoir conduire à des améliorations quantitatives et qualitatives de la productivité des Blés.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Ces études ont été entreprises dans des essais comportant :

— en 1970, 3 cultivars de Blés de type printemps (Rex, César, Atys), semés en lignes orientées nord-sud, à 16 cm d'écartement et 300 grains au mètre carré, et leurs associations ligne à ligne (Rex-César, Rex-Atys, César-Atys).

— en 1971, 5 cultivars (les trois précédents, plus deux demi-nains « mexicains », N 66 et N 68) et leurs associations ont été semés en deux essais (Rex, César, Atys, et Rex, N 66 et N 68) comportant Rex en témoin commun. En culture pure, les cinq cultivars ont été semés à 16 et 32 cm, à 48 grains par mètre linéaire (150 et 300 grains par m^2).

La masse sèche des Blés a été très différente d'une année à l'autre : on avait environ 400 g m^{-2} en 1970, et 800 g m^{-2} en 1971 pour le cultivar Rex.

On désigne sous le nom d'*albedo* la fraction de l'énergie solaire réfléchie par la végétation (reflectance en anglais). Elle peut être exprimée en *énergie* réfléchie (Wm^{-2}, J $cm^{-2}mn^{-1}$, cal cm^{-2} mn^{-1}, ou Ly mn^{-1} selon les auteurs), ou en *fraction* du rayonnement incident (1).

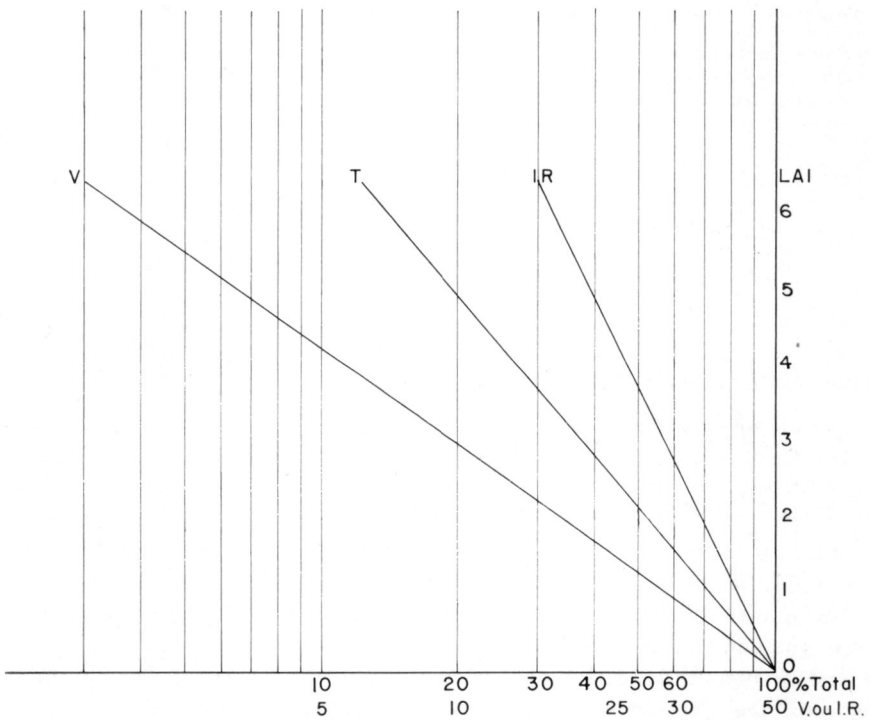


FIG. 1. — *Abaque exprimant la régression logarithmique des énergies Globale* (G), *Visible* (V) *et Infrarouge* (IR) *en fonction de l'indice de surface foliaire totale* (LAI) *de peuplements de Blé en pleine végétation*
(D'après des mesures personnelles et des données bibliographiques)

(1) 1 Ly mn^{-1} = 1 cal $cm^{-2}mn^{-1}$ = 4,18 J $cm^{-2}mn^{-1}$ = 697 W m^{-2}.

Beaucoup de données d'albedo, exprimées en pourcentage de la *lumière* incidente, sont obtenues au moyen de *Luxmètres*, dont les cellules photoélectriques ont une réponse qui dépend de la longueur d'onde reçue. La lumière réfléchie n'ayant pas la même composition que la lumière incidente (BONHOMME et VARLET-GRANCHER, 1972, par exemple), ces résultats ne peuvent *en aucun cas* être comparés à ce qui va suivre.

L'enregistrement continu des rayonnements solaires global et diffus incidents et de l'albedo du gazon était effectué en permanence à 500 m environ des parcelles expérimentales, sur le parc météorologique de la Bioclimatologie. Il a été ainsi possible d'extrapoler les données pour des journées non enregistrées sur les essais.

Des pyranomètres linéaires, dont le principe de fonctionnement a été décrit antérieurement (COMBRES *et al.*, 1970), ont été installés au-dessus de la végétation pour suivre le rayonnement global incident et sa composante infrarouge (pour quelques journées). D'autres ont été placés en position inversée pour mesurer l'albedo global du Blé et sa fraction infrarouge (pour quelques journées).

La mesure de l'infrarouge solaire a été effectuée en plaçant dans les pyranomètres linéaires un filtre (WRATTEN 88 A) qui absorbe la fraction visible (0,4-0,75 μm). On connaît ainsi, par différence, l'énergie visible arrivant au niveau considéré.

Ces pyranomètres (avec ou sans filtre) ont été placés aussi à différents niveaux dans la végétation (10, 20, 30, 40, 50,60 et 80 cm, selon les cas). Une vingtaine de journées ont ainsi été enregistrées chaque année (sur un potentiomètre enregistreur en 1970, et sur des millivoltmètres enregistreurs en 1971). Les dépouillements ont été faits de 5 en 5 minutes en 1970, et de 15 en 15 minutes en 1971, ce qui correspond mieux au temps de réponse réel du peuplement de Blé aux modifications microclimatiques.

Deux à six *cas* différents ont ainsi pu être analysés chaque journée, en plaçant 2 ou 3 capteurs à chaque niveau de mesure.

Un abaque simplifié (fig. 1) permet par ailleurs de calculer, à partir du rayonnement global incident mesuré à un niveau donné du couvert, les fractions visible et infrarouge. Il a été établi à partir de nos mesures, et contrôlé à l'aide des données fournies par SZEICZ (1969), dans des conditions écologiques différentes. Les déterminations sont valables à l'échelle de temps de la *journée*. Une autre utilisation de cet abaque est la détermination de la surface foliaire équivalente (LAI) présente au-dessus du point de mesure. Ces estimations ne sont exactes que pour autant que les organes soient verts : à la maturation, la notion de LAI n'a d'ailleurs plus de sens biologique net.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. — *Étude de l'albedo de peuplements de Blé*

1. *Importance de l'albedo.*

De nombreuses séries de mesures effectuées à l'aide de pyranomètres ont été publiées depuis quelques années en ce qui concerne le Blé (notamment FUCHS *et al.*, 1972, STANHILL *et al.*, 1972). Elles indiquent toutes que l'albedo des Blés est compris entre 15 et 35 p. 100 du rayonnement incident, et que ces variations importantes sont dues au stade végétatif, au cultivar, ou aux conditions générales de milieu (humidité du sol, hauteur du soleil, densité du peuplement...).

Les mesures d'albedo sur sol nu varient dans de plus larges proportions encore (de 6 p. 100 pour un sol noir, à plus de 35 p. 100 pour un sable blanc). Des mesures effectuées en octobre à Versailles indiquent que l'albedo moyen est voisin de 18 p. 100 sur sol nu, quel que soit la couverture du ciel (entre 50 et 500 W m^{-1}) ; mais un minimum (15,5 p.100) s'observe vers midi, et pour une même hauteur du soleil, l'albedo est plus fort l'après-midi que le matin. Les variations observées (fig. 2) par temps couvert sont dues en partie aux erreurs expérimentales quand l'albedo a de faibles valeurs absolues (rayonnement incident inférieur à 50 W m^{-2} vers midi le 24).

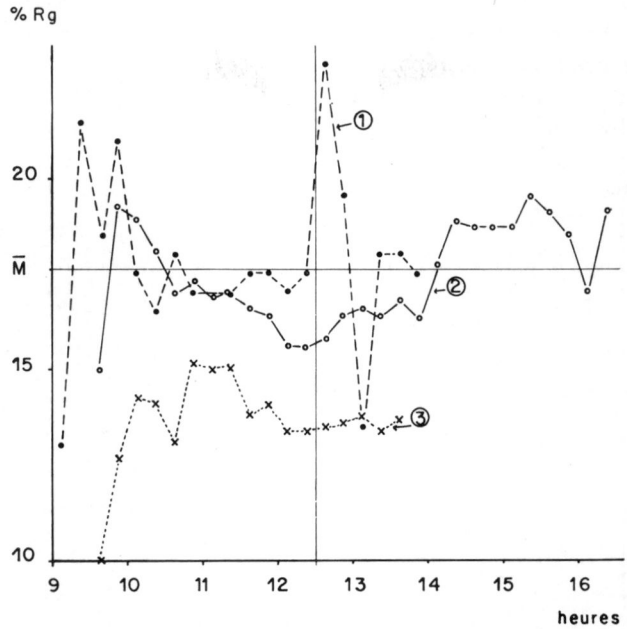


FIG. 2. — *Évolution de l'albedo du sol nu, les 24 et 25 octobre 1972 à Versailles, en fonction de l'heure, et en pourcentage du rayonnement global* (Rg)

(1) albedo global, ciel couvert. (2) albedo global, temps clair. (3) fraction infrarouge, en pourcentage du rayonnement global incident, par temps clair

2. *Variations de l'albedo au cours de la journée.*

Au début de juin 1971, le Blé Rex était au stade 8-9 de FEEKES (1941). Des variations notables d'albedo apparaissent d'un jour à l'autre : par temps clair (1 et 2/06, vers midi) il est voisin de 23 p. 100 ; il croît le 7 de 24 à 28 p. 100 à mesure que le

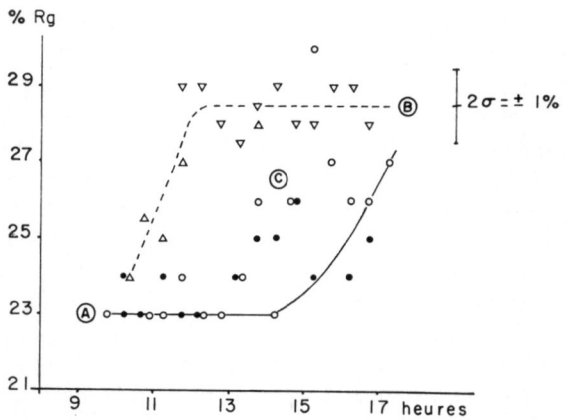


FIG. 3. — *Évolution de l'albedo sur le Blé Rex en juin 1971, par temps clair* (A), *et par temps couvert* (B) *ou pendant des périodes de passages nuageux* (C)

Mesures faites les 1er (●), 2 (○), 7 (△) et 8 (▽) juin. Les albedos sont moyennés pour des périodes de 15 minutes, et exprimés en pourcentage du rayonnement global incident. Les heures sont en temps légal (GMT + 1). Des variations inférieures à ± 1 p. 100 ne sont pas significatives, au seuil de 5 p. 100.

temps se couvre, pour rester voisin de 28 p. 100 toute la journée du 8 (par temps couvert) : les valeurs intermédiaires d'albedo traduisent donc des périodes de temps variable. Ces données ont été reportées fig. 3.

L'évolution constatée après la floraison est reportée figure 4, pour trois belles journées de juillet 1970 et 1971 ; le sol était sec sous les Blés en surface.

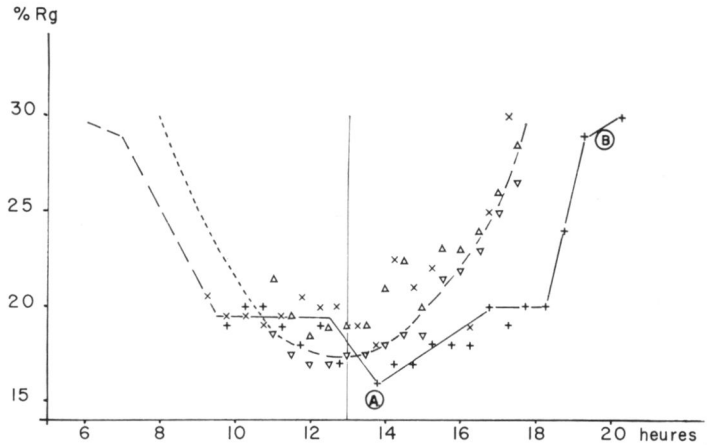


FIG. 4. — *Variations de l'albedo pour plusieurs journées de juillet 1970 et 1971, sur le Blé Rex. Stade « Grain-laiteux » ; feuilles culmaires jaunissantes*

En (A), le soleil est dans l'axe des lignes de semis ; en (B), les faibles valeurs absolues rendent la signification des données faibles. + 22.07.70 ; × 19.07.71 ; ▽ 12.07.71 sur Rex ; △ *id* sur Atys

Un minimum très net (voisin de 16 p. 100) apparaît vers 13 h en 1970 : les lignes de semis sont nettement individualisées, car le peuplement est peu développé, et le soleil parvient au sol à cette heure, car il se situe dans l'axe (nord-sud) des lignes. La réponse différente de l'albedo le matin et le soir peut être partiellement due à la position relative de l'albédomètre (orienté nord-sud, comme les lignes de semis) sur la culture ; les variations observées entre 10 et 16 h sont probablement dues à des passages de cirrus dans le ciel ; mais elles ne sont pas significatives : la limite de signification est de 1 p. 100 environ, pour un rayonnement incident de 700 W m^{-2} et de 2 p. 100 entre 100 et 200 W m^{-2}.

En 1971, l'albédomètre a été orienté est-ouest, pour éviter autant que possible cet effet, compte tenu des observations de l'année précédente. La végétation, plus abondante, occupe mieux les interlignes ; c'est pourquoi, si un minimum apparaît nettement vers midi (solaire), il ne fait pas apparaître l'effet des lignes de semis : les piles, à cheval sur deux lignes, intègrent la réponse moyenne de l'ensemble. Les valeurs supérieures à 21 p. 100 observées vers midi sont dues à de brefs passages nuageux.

Les albedos des quatre principaux cultivars utilisés en 1971 (Rex, César, Atys et N 68) ont été comparés le 12 juillet. On n'a reporté sur la figure 6 que deux courbes, correspondant aux extrêmes observés. Elles permettent de constater que l'albedo dépend nettement de la variété considérée (et du stade que celle-ci a atteint), et que l'écart se maintient tout le jour. Atys a un albedo plus important que Rex, et ces deux cultivars sont approximativement au même stade végétatif.

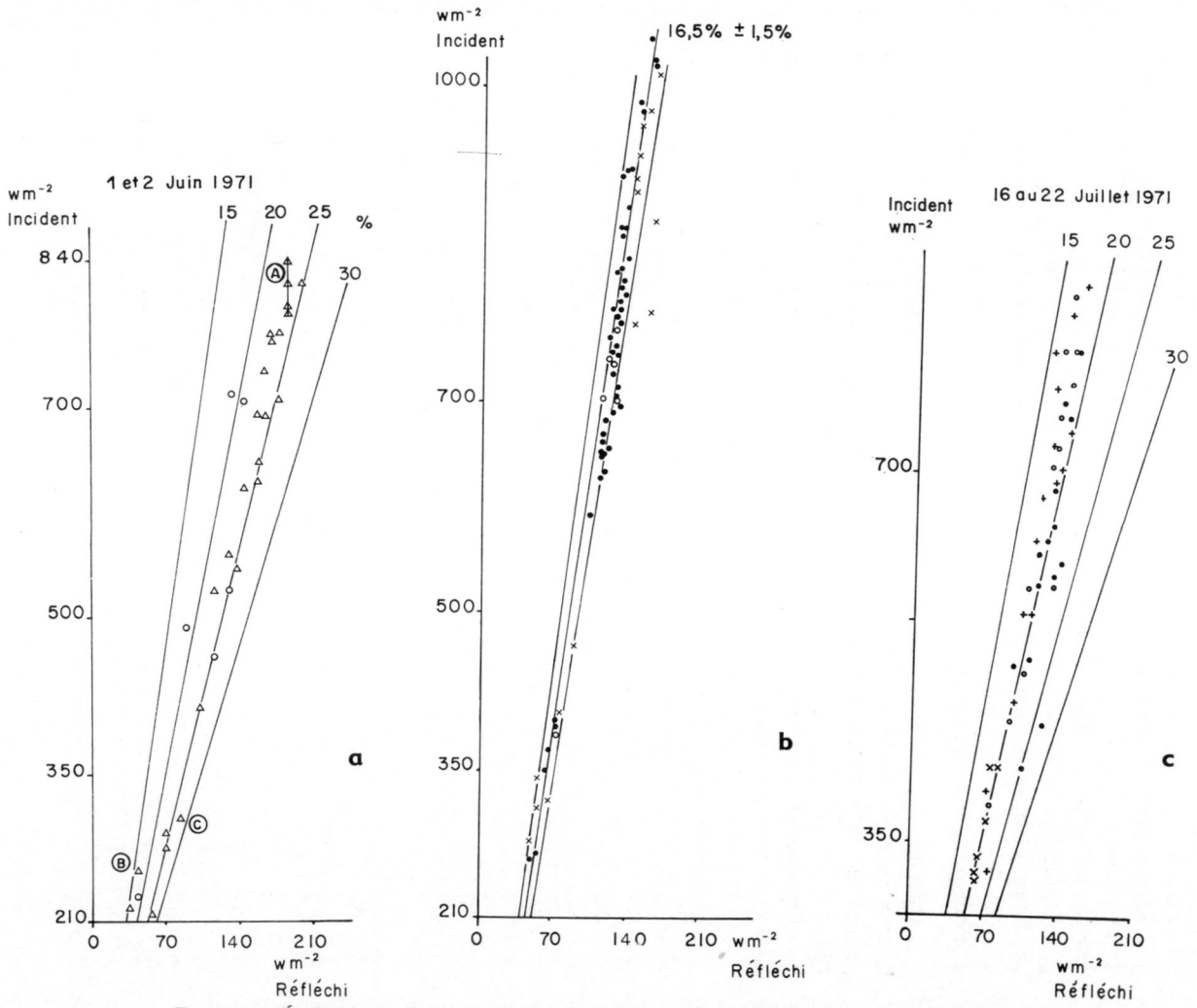


FIG. 5. — *Évolution des albedos en fonction du stade végétatif des Blés, du type de temps et de l'heure*

(*a*) phase montaison. (A) Ciel clair (13 à 14 h) ; (B) passage nuageux (vers midi) (C) ciel clair avant 9 h et après 17 h.

(*b*) Stade grain-laiteux, 7 au 10 juillet 1970. L'albedo varie peu au cours de la journée. La feuille culmaire est sénescente.

(*c*) 16 au 22 juillet 1971. Début maturation, le dernier entre-nœud reste seul vert. L'albedo croît (en valeur relative) quand l'énergie incidente se réduit, par temps clair (influence croissante du rayonnement diffus).

3. *Variations de l'albedo avec le stade végétatif atteint par la culture.*

Trois stades caractéristiques ont été représentés figures 5, de la montaison à la maturation.

La figure 5 A se rapporte à la phase de montaison. Par temps clair, entre 12 et 14 h, le rayonnement global reste voisin de 820 W m^{-2}, et l'albedo approche 23 p. 100 (A). Un passage nuageux (B) vers midi le *réduit* (18 p. 100) fugacement, et le reste du jour, il est voisin de 25 p. 100. Les valeurs atteintes en fin de journée, pour des énergies inférieures à 200 W m^{-2} n'ont pas été figurées ici, mais l'albedo croît alors. Les valeurs absolues sont peu significatives, car les niveaux énergétiques sont faibles.

Entre l'épiaison et la floraison, l'albedo est remarquablement stable à l'échelle de temps de la journée (fig. 5 B) : 16,5 $\pm$ 1,5 p. 100 entre 200 et 1 200 W m^{-2}, sauf quand on observe de brefs passages nuageux.

Quand on atteint la maturité (fin juillet, fig. 5 C), l'albedo varie de 18 à 25 p. 100 par temps clair, selon l'heure des mesures, quand l'énergie décroît de 800 à 200 W m^{-2}.

4. *Composition du rayonnement réfléchi.*

Quelques journées de mesures ont été consacrées à cette étude en 1971, de la montaison au stade grain-laiteux (tabl. 1 ; fig. 6). Ces observations ont été complétées par des mesures sur sol nu, faites en octobre 1972, par temps clair et couvert (fig. 2).

On constate que, dans toutes ces situations bien différentes, l'énergie réfléchie *dans le visible* est faible par rapport à l'énergie infrarouge. Elle reste en moyenne

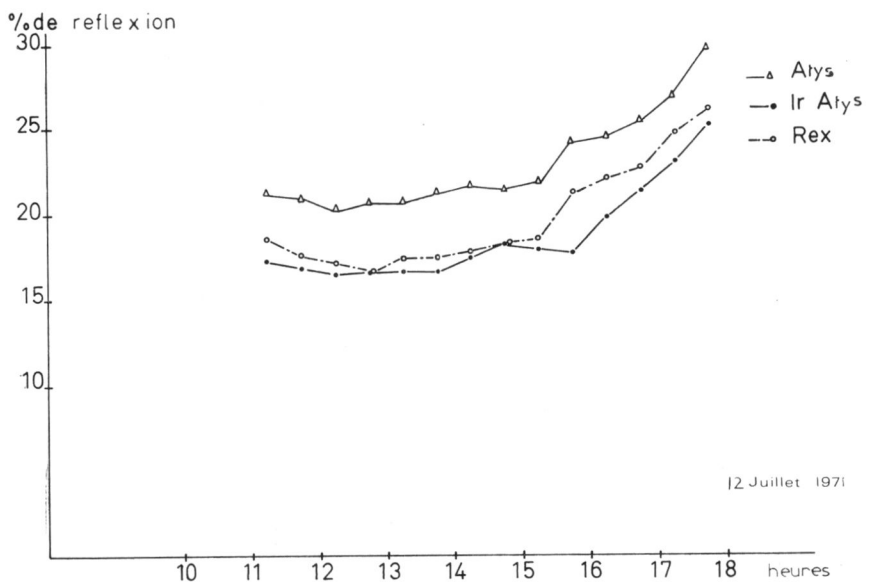


FIG. 6. — *Évolution de l'albedo, exprimé en fraction de l'énergie incidente, le 12 juillet 1971 au-dessus de Rex et d'Atys, et fraction infrarouge réfléchie par Atys* (IR Atys), *par rapport au rayonnement global incident*

La différence △ - ○ correspond au visible résiduel

de l'ordre de 20 W m^{-2} au-dessus du Blé, ce qui représente 2 à 3 p. 100 du rayonnement incident. On constate par ailleurs que le sol a des propriétés réfléchissantes peu différentes de celles de la culture, dans les conditions particulières de Versailles-La Minière au moins.

TABLEAU I

Composition du rayonnement réfléchi

Dates	Cultivar	Stade	Type de temps	Albédo moyen (%)	Répartition de l'énergie réfléchie		Valeur visible réfléchi Wm^{-2}
					visible	IR	
8-06	Rex	épiaison	nuageux avec éclaircies	22 ± 2	13	87	21
12-07	Atys	grain laiteux	clair à peu nuageux	21,5 ± 2	13	87	18
24-10	sol nu		nuageux	18 ± 4	19	81	6
25-10	sol nu		clair	17 ± 2	20	80	16

Rappelons que l'énergie solaire globale est constituée en moyenne de 46 à 48 p. 100 de visible (entre 0,38 et 0,75 μm) ; on a donc une absorption beaucoup plus considérable de l'énergie visible par le sol et la végétation que de l'énergie infrarouge (0,75-3,0 μm).

5. *En conclusion,* on peut présenter quelques observations générales concernant l'albédo :

Quand le couvert végétal est à peu près continu, la fraction réfléchie par un Blé en pleine croissance est de l'ordre de 20 p. 100, mais elle devient inférieure à 17 p. 100 vers midi, si le soleil arrive au sol, et cette chute de l'albedo est d'autant plus marquée que le couvert est plus discontinu : des lignes orientées nord-sud facilitent cette pénétration ; mais l'albedo dépasse 30 p. 100 en début et en fin de journée, quand le rayonnement diffus devient prédominant. Quant tout organe vert a disparu du Blé, on observe une réduction sensible de l'albedo. Ce résultat s'oppose assez nettement à ceux de FUCHS *et al.* (1972), mais les conditions de sol, de climat et les cultivars différents peuvent être en cause.

La plus grande partie de l'albedo est constitué d'infrarouge (80 à 90 p. 100). En première approximation, tout le rayonnement visible est absorbé par la culture, à l'exception du vert-jaune. STANHILL *et al.* (1972) arrivent aux mêmes conclusions.

Quand l'énergie incidente est constituée pour l'essentiel de diffus, l'albedo augmente en valeur relative, au moins tant que la végétation est bien verte, et il est relativement enrichi en infrarouge. Par temps clair, et pour des hauteurs apparentes du soleil supérieures à 30° en tout cas, l'absorption du rayonnement par la végétation est plus importante : dans ces conditions, le diffus ne représente guère que 20 p. 100 du global.

On va voir maintenant comment cette énergie incidente est absorbée dans la végétation, et son action sur la productivité des différents organes chlorophylliens du Blé.

B. — *Étude de l'extinction du rayonnement solaire dans des peuplements de Blé*

Des différences notables, dues aux densités de semis, aux cultivars et à la hauteur apparente du soleil ont été mises en évidence. On a comparé ces données à celles obtenues par ailleurs par analyse de la croissance (BALDY, 1973 *d*) ou par étude de la photosynthèse apparente (BALDY, 1973 *c*), pour calculer le rendement énergétique de chaque organe au cours de sa vie.

1. *Différences dues aux cultivars et à leur port.*

Pour suivre au mieux l'évolution des phénomènes, on a représenté les résultats les plus caractéristiques des deux années.

L'énergie arrivant à dix centimètres au-dessus du sol a été mesurée dans les cinq cultivars suivis en 1971, et dans plusieurs associations de ceux-ci au premier tiers de la montaison (1er et 2 juin). Les Blés français avaient 30 cm de haut environ, et les Blés demi-nains 20 cm. La figure 7 rapporte les résultats du 2 juin : des mesures comparatives on été faites en utilisant Rex comme témoin commun les deux journées,

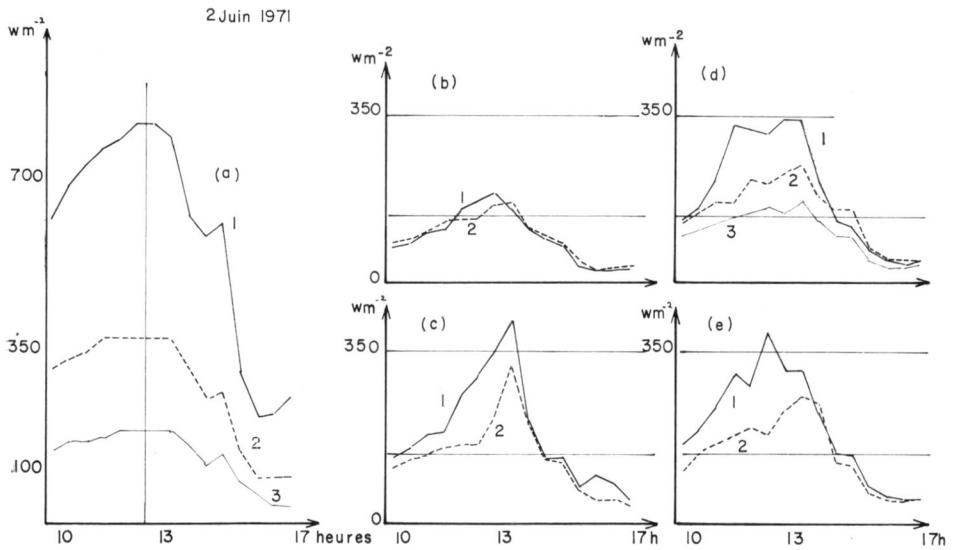


FIG. 7. — *Évolution du rayonnement solaire au dessus de la végétation, et fraction résiduelle à 10 cm au-dessus du sol le 2 juin 1971*

(*a*) Évolution des rayonnement global (1), infrarouge incident (2) et de l'albedo (3) au dessus d'Atys.
(*b*) Énergie résiduelle dans Rex, semé à 16 cm. (1) et (2) : réponse de deux paires de piles à 10 cm au-dessus du sol.
(*c*) Même légende, lignes espacées de 32 cm.
(*d*) Énergie résiduelle dans Atys semé à 16 cm. (1) et (2) : réponse de deux paires de piles à 10 cm (3) : fraction infrarouge exprimée par rapport au global, au voisinage des piles (2) ; le visible est donné par différence de (2) — (3).
(*e*) Énergie arrivant à 10 cm dans l'association des deux Blés demi-nains N 66 et N 68. (1) dans l'interligne, (2) sur la ligne semée en N 66. Moyenne de deux pyranomètres chaque fois.

et on a pu constater que les résultats de celles-ci coïncidaient exactement. Alors que le développement des trois Blés français était visuellement (et pondéralement) analogue, l'énergie résiduelle dans *Atys* est double (500 J cm^{-2} pour le jour entier) de celle arrivant au même niveau dans Rex et César, en semis à 16 cm. Selon la position de chaque pyranomètre (1) ou (2), dans la culture, on observe des écarts de l'énergie incidente qui atteignent 20 p. 100. Dans l'association (non figurée ici) des deux Blés Rex et Atys, chaque pyranomètre traduit approximativement l'influence du cultivar au voisinage immédiat duquel il se trouve. Les pics énergétiques sont généralement bien marqués vers midi, sauf dans Rex, dont le port prostré couvre mieux les interlignes. Il est particulièrement net dans Atys (vers midi), et surtout il est de plus longue durée ; dans Rex semé à 32 cm, le pic de midi est très net, mais de courte durée, et l'énergie résiduelle est identique dans ce peuplement de Rex à celle enregistrée dans Atys semé à 16 cm. L'association de N 66 et N 68 est tout à fait analogue à la culture pure d'Atys à 16 cm, car ces trois cultivars ont un port dressé.

L'énergie arrivant à 10 cm au-dessus du sol est du même ordre de grandeur

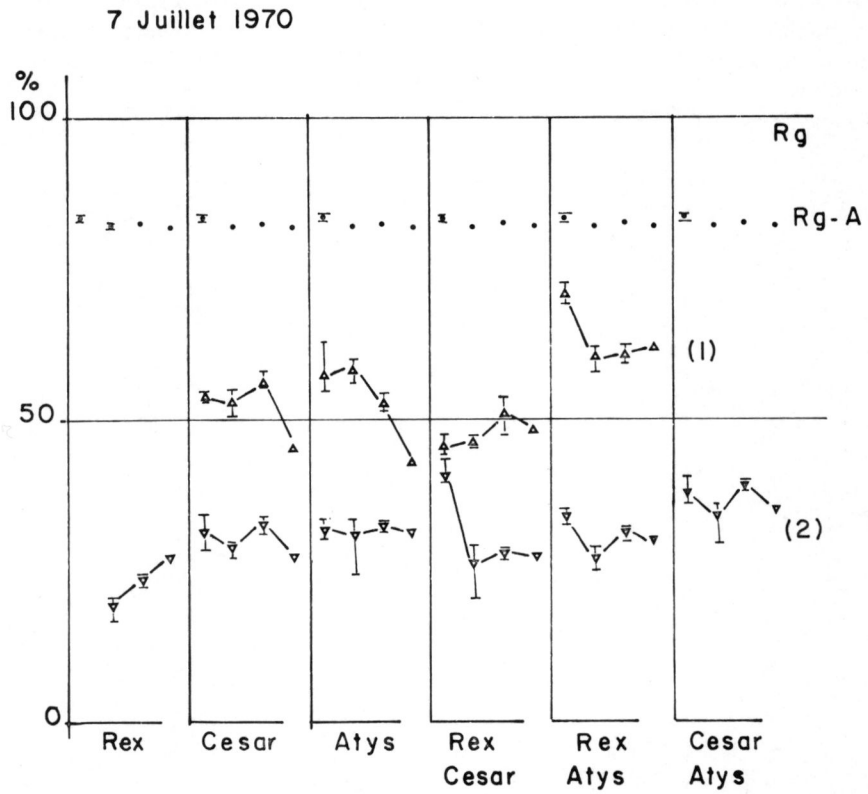


FIG. 8. — *Comparaison des énergies incidente et résiduelle dans les cultures pures et les associations le 7 juillet 1970 de 10 à 17 h*

Chaque point des figures correspond à la moyenne des données de 2 h. Hauteur totale des plantes : Rex et Atys 0,90 m ; César 1,10 m. Les feuilles culmaires sont encore vertes. Valeurs exprimées en pourcentage du rayonnement incident; Les albedos sont exprimés en Rg-A pour la clarté des figures. En fait l'albedo n'a été mesuré que sur Atys pur. (1) énergie globale résiduelle à 40 cm ; (2) énergie à 20 cm en pourcentage de Rg

que l'énergie réfléchie par l'ensemble du couvert. Mais la fraction visible représente encore 10 p. 100 du rayonnement incident à 10 cm, et n'est que de 2 à 3 p. 100 de celui-ci dans l'albedo, on vient de le voir.

Les données du 7 juillet 1970, obtenues sur Rex, César et Atys seulement (et leurs associations) peuvent être comparées à celles qui précèdent. Ici encore, Rex intercepte plus d'énergie que les deux autres cultivars, qui se comportent de façon analogue. L'énergie réfléchie par l'albedo est ici encore comparable à celle qui atteint le sol. Tout le feuillage était situé à cette date entre 50 et 80 cm, pour une hauteur totale des Blés de 1 m. On constate que les associations de Rex et Atys, et de César et Atys, sont plus *ouvertes* que chacune de leurs cultures pures : les discontinuités créées par les associations se sont traduites (dans les conditions de milieu de 1970) par une meilleure pénétration de la lumière dans le peuplement (fig. 8).

2. *Influence de la hauteur du soleil et du type de temps sur l'extinction de la lumière dans les peuplements.*

L'énergie solaire globale passe évidemment par un maximum vers midi par temps clair, et sa pénétration dans le couvert est également maximale à cette heure. La répartition du rayonnement dans la culture par temps clair dépend d'abord de la hauteur du soleil (fig. 9 *a*, par exemple). Le soleil, bas sur l'horizon le matin et le

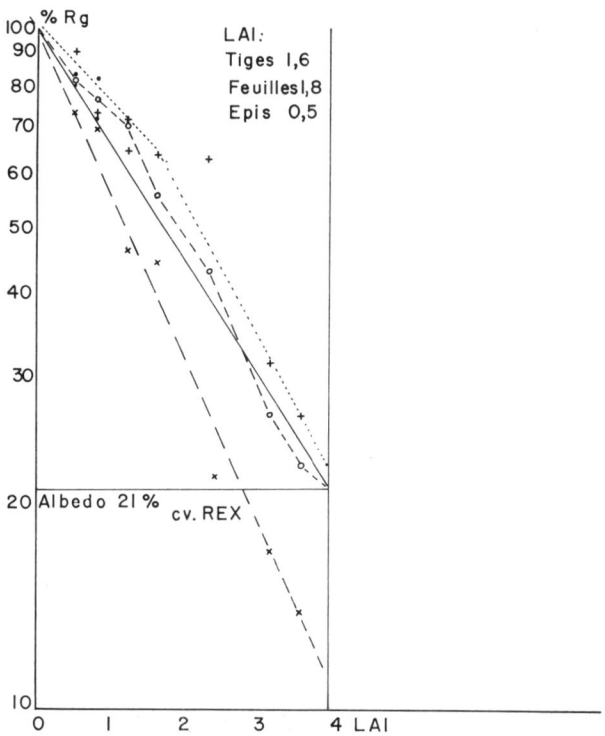


FIG. 9. — *Extinction de l'énergie dans le peuplement, en fonction du LAI total* (tiges et feuilles) *en 1970, le 6 juillet dans Rex*

Début du stade Grain-laiteux ; temps clair : Rg varie de 250 à 720 W m^{-2} au cours de la journée. (×) données des premières et dernières heures de la journée ; (+) données obtenues vers midi ; (○) données obtenues entre 9 et 11, et entre 15 et 16 h.

soir, n'apporte qu'une faible énergie sur une surface horizontale, et l'essentiel du rayonnement est constitué de *diffus*. Si on considère la répartition du rayonnement dans le temps, tout se passe alors comme si la surface foliaire *apparente* devenait plus importante : les « rayons » du soleil pénètrent peu ou pas dans la culture (semée nord-sud, rappelons-le), comme on l'a schématisé sur la figure 10.

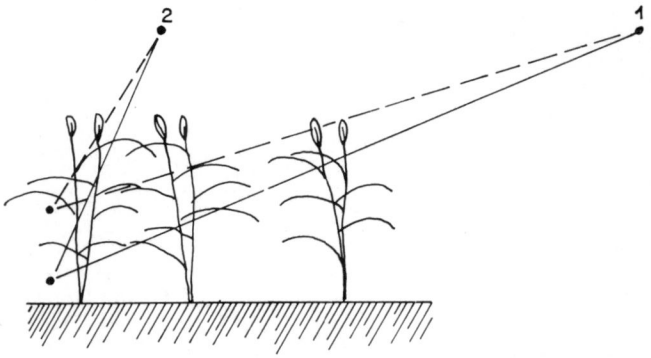


FIG. 10. — *Schéma de la pénétration du rayonnement dans le couvert*
(1) soleil rasant (avant 9 h ou après 17 h) ; (2) vers midi

L'énergie arrivant à un niveau donné dans la végétation peut s'exprimer par :

$$E = R \sin i \, e^{-kS} + D \, e^{-kS}$$

dans laquelle E est l'énergie résiduelle au niveau considéré, R le rayonnement solaire direct incident, sin i la hauteur apparente du soleil, D le rayonnement diffus, S la surface apparente du feuillage au-dessus du niveau considéré, exprimée en LAI, et k le coefficient caractéristique d'extinction dans la culture.

Matin et soir, le premier terme devient petit devant le second ; la réduction de l'énergie résiduelle est moins rapide que celle qu'on déduirait de la seule mesure des rayonnements directs ; mais cette énergie est de faible valeur absolue. Ces résultats sont confirmés par ceux de NORMAN *et al.* (1971).

Les figures 11 présentent l'évolution de l'énergie (en valeur absolue, et en pourcentage du rayonnement incident) dans Rex (*a* et *b*) et dans l'association Rex-N 66 (*c*), le 22 juin 1971. Les deux dernières feuilles des Blés étaient encore vertes, et situées entre 50 et 80 cm chez Rex, et entre 30 et 50 cm chez N 66, et les LAI totaux étaient voisins de 6. L'énergie mesurée à 60 cm dans Rex correspond donc à celle arrivant aux feuilles culmaires, et le niveau 40 cm dans l'association correspond à la base des épis de N 66.

Le temps couvert s'est temporairement dégagé vers 16 h (fig. 11 *a*). En culture pure, la *fraction* interceptée à 60 cm diminue notablement alors, mais aucune différence n'apparaît à 30 et 10 cm : le soleil est trop bas sur l'horizon. L'énergie reste insuffisante pour assurer une assimilation nette notable à ces niveaux. On a pu constater par temps clair pendant la même période (pour des journées non figurées ici) que l'énergie solaire directe n'arrive à aucun moment de la journée à 10 cm dans Rex avec une intensité suffisante pour assurer une assimilation nette positive pendant plus d'une ou deux heures par jour.

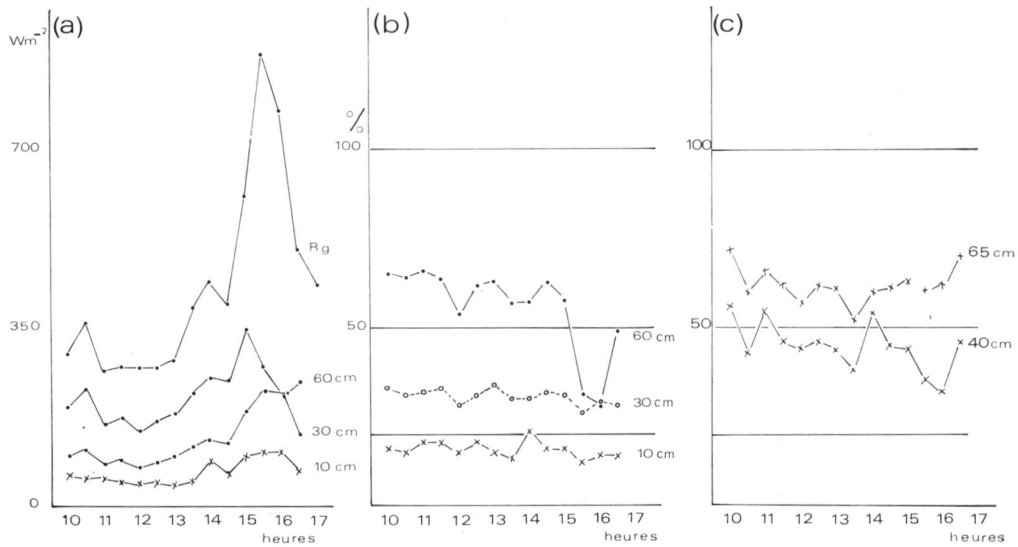


FIG. 11. — *Extinction de l'énergie le 22 juin 1971*

(*a*) répartition dans le profil (à 60, 30 et 10 cm) ; (*b*) et (*c*) extinction dans les profils, exprimées en pourcentage du rayonnement incident ; (*b*) dans Rex en culture pure à 16 cm d'écartement ; (*c*) dans l'association Rex-N 66 : moyenne des données de 7 pyranomètres à la base des feuilles culmaires de Rex (65 cm) et 6 pyranomètres au voisinage de la base des épis de N 66 (40 cm).

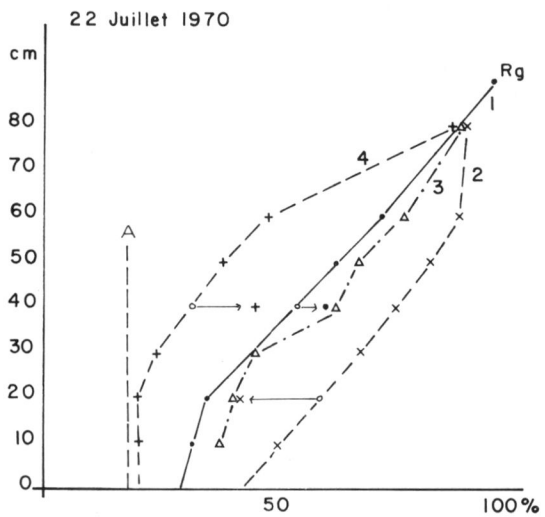


FIG. 12. — *Extinction de la lumière le 22 juillet 1970* (début de la maturation des caryopses) *en pourcentage du rayonnement incident*

(A) albedo de la culture (moyenne de 9 à 18 h) ; (1) moyenne générale de 9 à 18 h ; (2) moyenne de 12 à 14 h ; (3) passage nuageux vers 12 h ; (4) moyenne de 17 à 18 h. Les flèches indiquent des valeurs aberrantes obtenues, dues à la position de piles en situation trop éclairée.

Il ne reste pratiquement plus de feuilles vertes le 22 juillet, en fin de végétation (fig. 12) ; le dernier entre-nœud est seul vert ; mais les feuilles sèches constituent un écran, qui intercepte de la lumière. Une grande partie de l'énergie arrive vers midi, et la végétation adventice peut se développer activement (en particulier des liserons).

3. *Comparaison de l'extinction du rayonnement dans une culture pure, et dans l'association en lignes alternées de deux cultivars de taille très différente* (fig. 13).

a) *Cultures pures.*

A l'épiaison, l'extinction est rapide dans N 66, qui compte plus de mille talles par mètre carré, malgré ses feuilles culmaires relativement petites (25 × 2 cm) et dressées : elle est comparable à celle mesurée dans César, de taille beaucoup plus grande, dont les grandes feuilles culmaires (35 × 2,5 cm) ont un port retombant, mais qui compte 40 p. 100 de talles en moins par mètre carré. Rex et Atys ont à peu près la même taille, mais Atys a un port de feuilles plus dressé, ce qui explique que ce dernier cultivar laisse plus pénétrer la lumière que Rex, le nombre de talles par unité de surface étant à peu près le même (600 à 700 par m²).

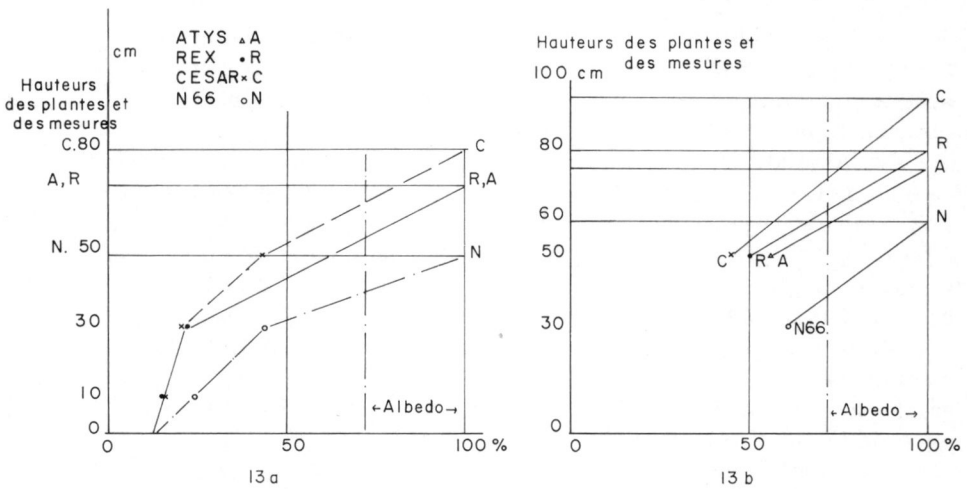


FIG. 13. — *Extinction de l'énergie dans le peuplement, en pourcentage du rayonnement global incident*

a) 7 juin 1971. Début épiaison. Extinction de l'énergie dans les Blés Rex (R), César (C) et Atys (A), et dans le demi-nain N 66 (N), semés à 16 cm, et hauteur totale des plantes en cm (en ordonnées). On a indiqué l'importance de l'albedo (Rg-A).

b) le 18 juin 1971, à la fin floraison (sauf Atys, fin épiaison) ; mêmes remarques qu'en *a*).

Les niveaux de référence choisis à la floraison (50 cm pour les Blés français, 30 cm pour N 66) correspondent approximativement à la base de la partie feuillée. L'ensemble des organes verts (feuilles culmaires, dernier entrenœud et épi) a un LAI voisin de 4 pour César, et de 3 pour Rex et Atys. A l'épiaison d'Atys, Rex est déjà à la floraison, et son dernier entre-nœud est donc plus développé.

Par temps couvert, l'extinction (fig. 11) est moins rapide, mais l'énergie est plus faible en valeur absolue, et elle est rapidement insuffisante pour assurer un fonctionnement notable de l'appareil photosynthétique des feuilles inférieures.

b) *En association.*

Les variations spatiales de l'énergie à chaque niveau du peuplement ont été figurées schématiquement sur les figures 14, qui rapportent l'énergie moyenne reçue aux différents niveaux de mesure les 22 et 23 juin 1971 dans l'association Rex-N 66. 75 p. 100 du rayonnement incident sont reçus au niveau des épis de N 66 par temps clair, et 85 p. 100 par temps couvert. L'énergie visible à ce niveau comporte 60 à 70 p. 100 du visible incident (selon la position des points de mesure) : on atteint 100 p. 100 à midi, et moins de 50 p. 100 avant 9 h et après 17 h.

A l'échelle de la journée, les 2 et 3 juillet 1971, par très beau temps (fig. 15 *b*), 43 p. 100 seulement de l'énergie globale est disponible au niveau des épis de N 66, ce qui représente 450 J cm^{-2} pour l'ensemble de la journée : on conçoit que leur croissance soit alors fortement ralentie. Les écarts d'éclairement s'estompent en fin de végétation (quand toutes les feuilles sont sèches), mais le développement des cultivars (ou des talles) dominés est définitivement perturbé alors.

4. *Énergie photosynthétiquement active disponible à chaque niveau de la végétation.*

Deux méthodes ont été utilisées simultanément pour déterminer la quantité d'énergie photosynthétiquement active (PhAR) dans les peuplements de Blé : des mesures directes de l'extinction des énergies globale et infrarouge à plusieurs niveaux (qui donnent la fraction visible par différence), et le calcul à partir d'un abaque que nous avons réalisé (fig. 1), en utilisant les coefficients d'extinction caractéristiques de chaque classe d'énergie.

Ces corrélations entre rayonnements global et infrarouge ne sont applicables en toute rigueur qu'en phase de végétation active. Ce n'est plus le cas des Blés mûrissants, formés de pailles et d'épis. Par ailleurs, les mesures différentielles (global-infrarouge) ne peuvent être valables qu'à condition d'intégrer la *même énergie* incidente, ce qui est réalisable avec notre appareillage ; c'est pourquoi la plupart des corrélations obtenues dans la littérature à l'aide de pyranomètres de petites dimensions sont peu satisfaisantes. Pour tenir compte de ces difficultés, les calculs n'ont été faits qu'en juin et début juillet, pour des journées à temps régulier, en intégrant sur 30 minutes les données de trois pyranomètres linéaires (deux en global, un en infrarouge), comme indiqué figure 16 *c*.

Les données concernant l'énergie résiduelle visible, infrarouge et globale, à 10 cm dans le Blé Atys, les 1er et 2 juin 1971, sont reportées figure 17. Le rayonnement visible total, mesuré entre 10 et 17 h, ne dépasse pas 160 J cm^{-2}. Avant 11 h, et après 15 h 30, la valeur instantanée de l'énergie visible reste inférieure à 50 W m^{-2}, et la photosynthèse apparente est réduite (MEIDNER, 1970). Les organes situés à moins de 10 cm le 1er juin ne présentaient une assimilation nette notable que moins de 5 h par jour, par temps clair, La composition du rayonnement global vers midi à 10 cm est peu différente de celle mesurée au-dessus de la végétation (cf. VARLET-GRANCHER et BONHOMME, 1971). Mais le PhAR diminue très vite, dès que le rayonnement solaire direct n'atteint plus la base de la végétation.

L'extinction de l'énergie visible au début du stade grain-laiteux a été reportée figure 15 *c*. Elle est à comparer à celle du rayonnement global figurée figure 15 *a*.

La feuille culmaire des Blés était encore fonctionnelle et la deuxième feuille souvent sénescente. L'énergie disponible à 30 cm (LAI = 4) est comparable à

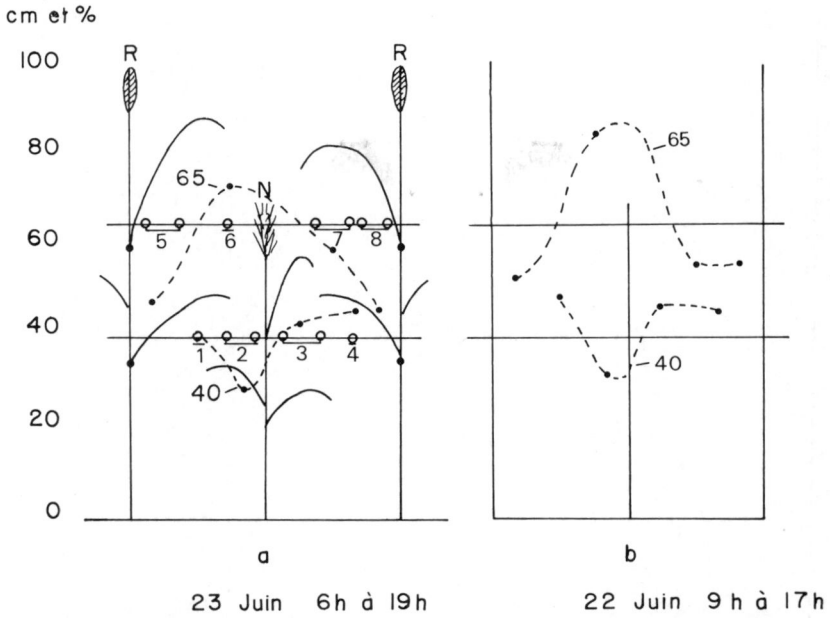


FIG. 14. — *Disposition des piles et extinction du rayonnement global* (exprimé en pourcentage de Rg) *dans l'association Rex-N 66, les 22 et 23 juin 1971.*

On a figuré l'emplacement des piles, le 23 juin ; aux positions 2, 3, 5, 7 et 8 : 2 pyranomètres en série, aux positions 1, 4 et 6 : 1 pyranomètre. L'installation était identique le 22. R : Rex ; N : N 66. Les hauteurs (en cm) et le pourcentage de l'énergie par rapport à Rg sont confondues en ordonnées dans cette figure.

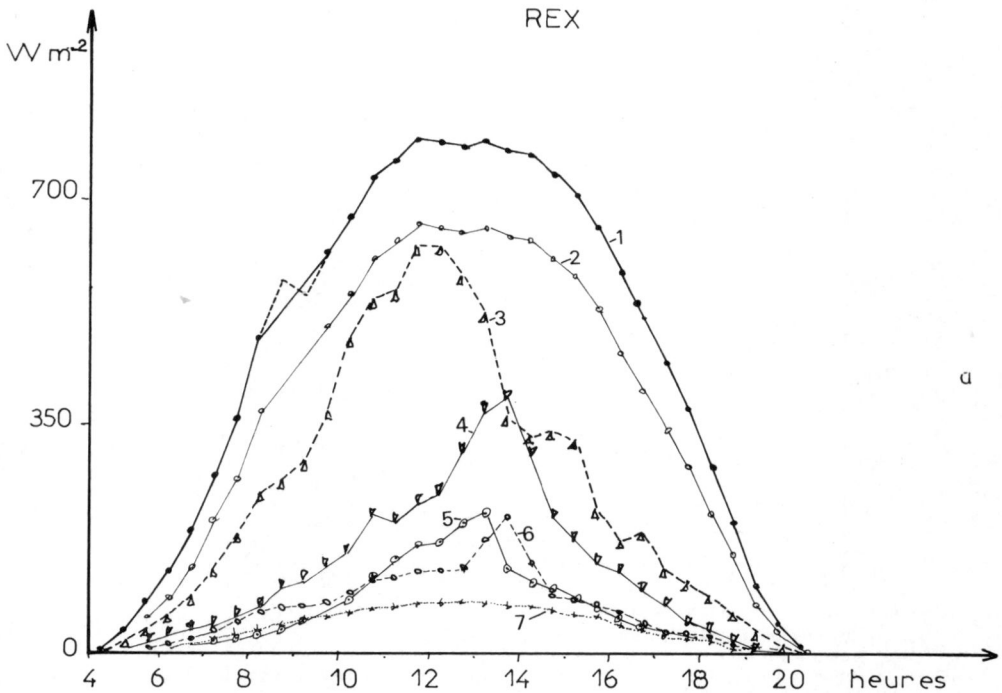


FIG. 15. — *Évolution de l'énergie incidente et de son extinction dans les peuplements de Rex et l'association Rex-N 66 les 2 et 3 juillet 1971 de 4 à 20 heures*

a) Peuplement pur de Rex (lignes à 16 cm) :
(1) Rg : 2 770 J cm^{-2}. (2) Rg-A (albedo) : 80 p. 100 ;
Dans la végétation : (3) à 60 cm ; (4) à 30 cm ; (5) à 10 cm (énergie globale) ; (6) énergie infrarouge à 10 cm ; (7) rayonnement remontant, mesuré à 60 cm au-dessus du sol.

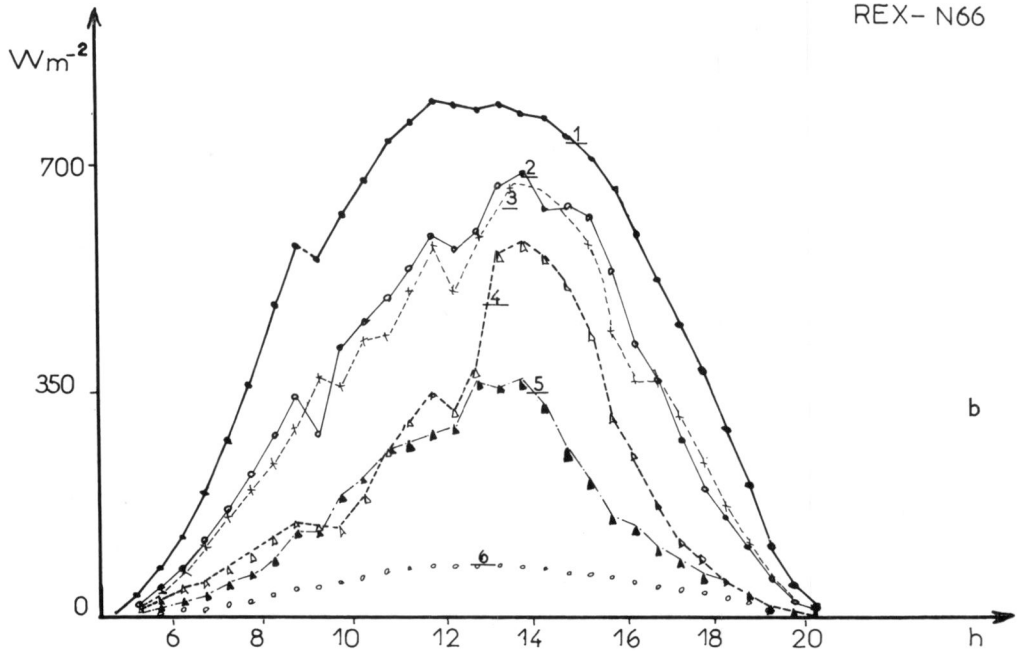
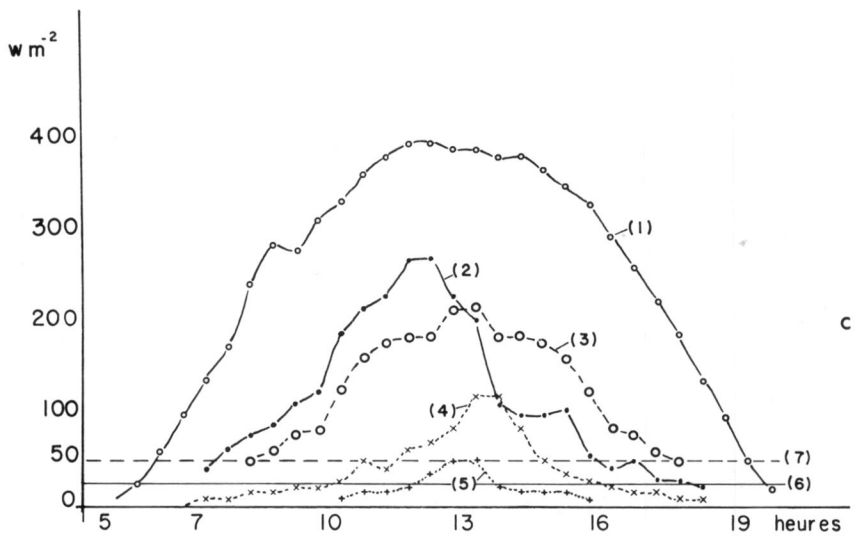


FIG. 15. — *Évolution de l'énergie incidente et de son extiaction dans les peuplements de Rex et l'association Rex-N 66 les 2 et 3 juillet 1971 de 4 à 20 heures*

b) Dans l'association Rex-N 66 :
(1) Rg ; (2) et (3) énergie globale à la base des feuilles culmaires de Rex (65 cm) : 69 p. 100 Rg ; (4) Base de la feuille culmaire de N 66 : 43 p. 100 Rg ; (5) à 30 cm (31 p.100 Rg) ; (6) réfléchi, mesuré à 60 cm (8 p. 100 Rg).



c) Extinction du rayonnement visible dans le Blé Rex :
(1) Rayonnement solaire visible ;
(2) Énergie visible à 60 cm au-dessus du sol (LAI 2) ;
(3) Même courbe, compensée des erreurs dues à la position relative des piles dans le peuplement par rapport au soleil ;
(4) à 30 cm (LAI 4) ; (5) à 10 cm du sol ;
(6) Valeur du point de compensation lumineux, en énergie visible de même composition que la lumière solaire ;
(7) Valeur probable du point de compensation en lumière pauvre en bleu et rouge clair.

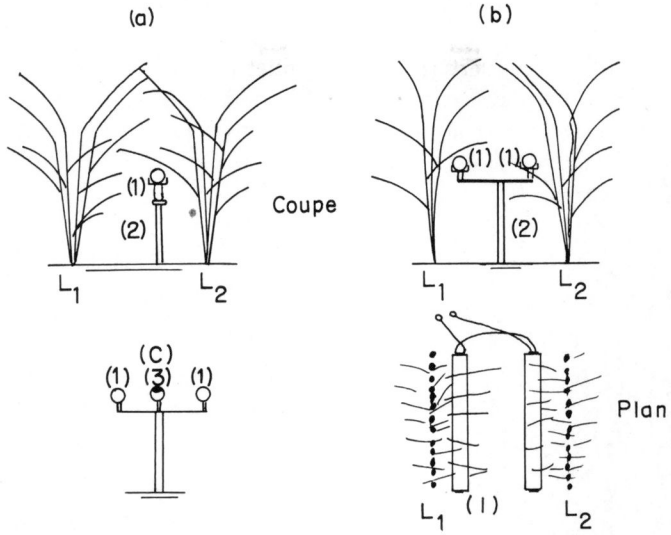


FIG. 16. — *Schéma d'installation des pyranomètres dans la végétation*

a) Cas d'une pile isolée ;
b) deux piles en série ;
c) cas où des mesures de fraction infrarouge de l'énergie incidente sont effectuées. L_1 L_2 : lignes de semis.
(1) pyranomètres en rayonnement global
(2) supports
(3) pyranomètre avec filtre infra-rouge W 88 A.

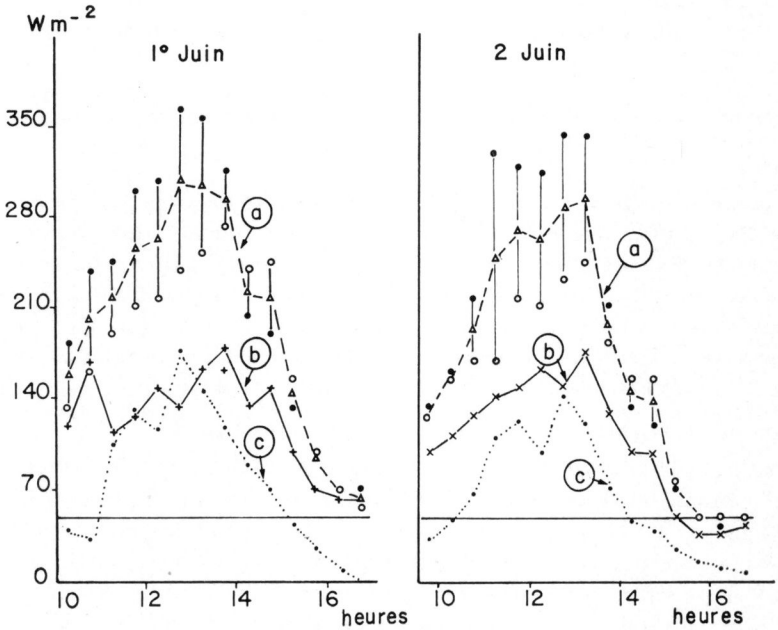


FIG. 17. — *Agrandissement des données du 1er et 2 juin 1971*

Énergie globale (*a*), infrarouge (*b*) et visible (*c*) mesurées à 10 cm du sol dans Atys. On a indiqué les valeurs extrêmes du rayonnement global mesuré à 10 cm

celle mesurée le premier juin à 10 cm (fig. 17). Aucune feuille ne survit à moins de 50 cm du sol. Les données de SZEICZ (1969), transcrites figure 18 (par temps clair (*a*), et par temps couvert (*b*), début juillet en Angleterre) confirment exactement nos propres observations : à un LAI supérieur à 5, l'énergie est constamment insuffisante pour assurer la photosynthèse, et les feuilles disparaissent.

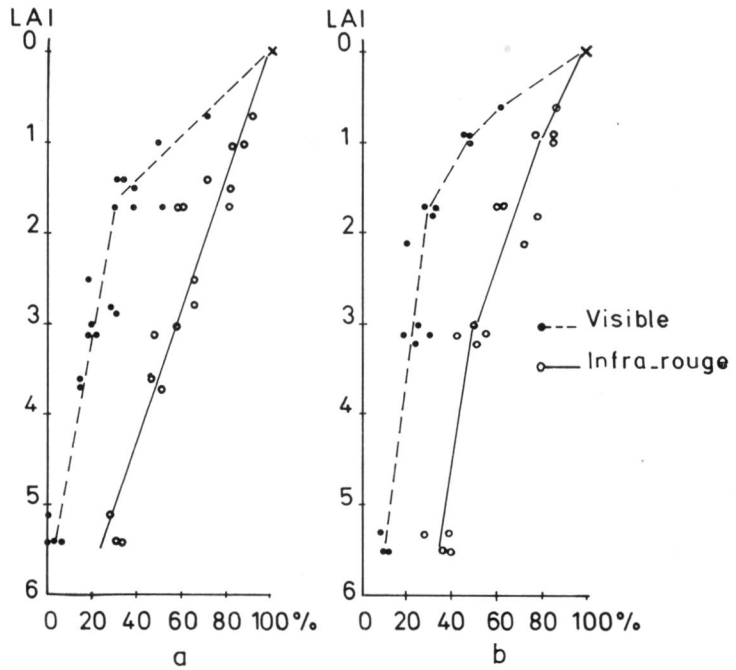


FIG. 18. — *Extinction des rayonnements incidents visible et infra rouge dans le Blé de printemps Colibri* (30 juin 1969) *par temps clair* (a) *et couvert* (b) (d'après SZEICZ, 1969)

Par temps clair (fig. 9), l'énergie globale est réduite de 70 p. 100 dès que le LAI dépasse 2. Par temps couvert (fig. 11), l'énergie incidente dépasse rarement 400 W m^{-1}, et sa fraction visible est inférieure au point de compensation lumineux au-delà d'un LAI de 2 ou 3 au plus. Ce dernier cas représente plus de 75 p. 100 du temps, si on ajoute aux jours de temps couvert les matins et soirs de temps clair. Cet indice foliaire correspond environ à l'ensemble des organes développés au-dessus du dernier nœud du Blé après l'épiaison, en conditions normales de semis.

5. *Rendement photosynthétique journalier de peuplements de Blé.*

Connaissant la croissance en masse sèche par unité de surface de sol et l'énergie incidente journalière, il est possible d'estimer le rendement photosynthétique net des peuplements à partir de la montaison. En négligeant les racines après cette date, on ne fait pas une grosse erreur, car 80 p. 100 de celles-ci sont déjà développées (cf. BALDY, 1973 *b*). On peut estimer à 30 ou 40 g m^{-2} la quantité de racines formées pendant la montaison, contre 400 à 600 g m^{-2} au moins de parties aériennes (exprimées en masses sèches). L'erreur est du même ordre que celles dues à l'échantillonnage (et on connaît son sens).

Les prélèvements effectués chaque année, de 1968 à 1972, permettent de calculer l'évolution du rendement photosynthétique net selon la méthode indiquée précédemment (BALDY et JONARD, 1969), pour neuf Blés d'hiver et de printemps, bien différenciés phénologiquement et morphologiquement, et leurs associations binaires. Les résultats obtenus en 1971 sont donnés au tableau 2 à titre d'exemple.

TABLEAU 2

Pourcentage du rayonnement incident transformé en matière sèche aérienne par jour

1971

Périodes	5-4/25-5	25-5/6-6	7-6/21-6	21-6/19-7	19-7/2-8
R_g incident total moyenne par jour J cm^{-2} Température moyenne	1 700 12,8°	1 755 13,6°	1 565 12,7°	2 190 17,6°	1 865 17,7°
Cultures pures semis à 16 cm :					
Atys	0,59	2,82	1,80	1,19	0,96
César	0,74	2,61	3,00	0,33	1,79
Rex	0,67	2,22	2,15	1,10	0,71
N 68	0,68	2,30	1,78	0,76	0
N 66	0,49	2,06	2,87	0,67	0
Cultures pures semis à 32 cm :					
Atys	0,47	1,35	3,22	0,52	1,27
César	0,57	2,44	2,68	0,75	0,0
Rex	0,45	2,28	2,05	1,03	0
N 68	0,38	1,97	1,69	0,69	0
N 66	0,32	1,91	1,91	0,81	0
Cultures associées à 16 cm :					
Atys + Rex	0,64	2,28	2,16	1,15	1,18
Atys + César	0,67	2,90	2,44	0,93	0,65
Rex + César	0,67	2,58	3,45	0,69	1,26
Rex + N 68	0,60	2,07	2,31	1,33	0
Rex + N 66	0,59	2,28	2,18	1,14	0
N 68 + N 66	0,59	2,15	2,75	0,59	0

N. B. : On a eu en outre 150 g m^{-2} environ de racines formées essentiellement entre le 5 avril et le 25 mai, soit 3 g m^{-2} j^{-1} ou 0,33 p. 100 du rayonnement incident.

L'énergie incidente est mal utilisée au début de la montaison, car le peuplement recouvre imparfaitement le sol, et l'erreur faite en négligeant la production de racines (de l'ordre de 0,3 p. 100 du rayonnement global incident) n'est pas négligeable. Les températures sont assez peu favorables, car des gelées au sol sont possibles jusqu'aux premiers jours de mai, alors que l'assimilation nette n'est optimale qu'au-dessus de 15°C au moins : ce seuil varie avec les cultivars (BALDY, 1973 *a*), mais il n'a pas été possible de l'étudier ici pour les variétés employées.

On a pu constater, par contre, que par temps constamment couvert et chaud

(moins de 500 J cm^{-2} et plus de 20°C), l'assimilation nette devient non mesurable en conditions naturelles, à l'échelle de temps de la journée : le bilan doit même être négatif, si on tient compte de la respiration nocturne (BALDY, 1973 *a*, 1973 *c*).

Pendant la montaison, les cultivars de printemps n'ont une photosynthèse importante qu'à partir du moment où leur indice foliaire (LAI) est suffisant (de l'ordre de 2 à 3 au moins) ; des Blés relativement tardifs et à port dressé comme Atys peuvent se trouver défavorisés par rapport à des cultivars plus précoces, comme César ou Rex. Mais le rythme interne de croissance des variétés ne dépend *certainement* pas *que* de ce phénomène.

La fraction du rayonnement solaire global transformé en matière sèche par les processus photosynthétiques ne dépasse pas 4,9 p. 100 dans nos essais. Cette valeur a été atteinte en 1968, à la fin de la montaison de Champlein. On a pu observer que, pour des périodes de dix jours, l'alternance de très belles journées (2 500 J cm^{-2}) et de jours très couverts (600 J cm^{-2}) se traduit par un rendement photosynthétique *moyen* très inférieur à une période de journées médiocres (1 500 à 1 800 J cm^{-2}) à la même phase de croissance. Le rayonnement global *moyen* est approximativement le même, mais le rendement photosynthétique du Blé *plafonne* au cours des belles journées, et aucune assimilation nette n'est décelable par temps très couvert.

Dans les calculs de la masse sèche *formée*, il faudrait tenir compte des pertes dues à la respiration obscure, ce qui permettrait de connaître le rendement *diurne* de la photosynthèse. Ce calcul est difficile à faire actuellement, car on connaît peu ou pas l'évolution de la respiration nocturne en fonction des conditions climatiques. On sait seulement que des différences notables existent entre cultivars (STOY, 1965, par exemple). La masse sèche formée sur une période de dix jours ne dépasse guère 45 g m^{-2} par jour (en mai ou juin). Pour plus de détails, on peut se reporter aux autres articles de la série (BALDY, 1973 *a*, 1973 *c*).

CONCLUSIONS

Des différences notables d'albedo ont été mises en évidence pour un grand nombre de cultivars d'espèces diverses dans la littérature, mais on savait peu de choses des différences éventuelles de répartition de l'énergie entre visible et infrarouge : comme l'albedo varie dans de fortes proportions, en valeur absolue comme en composition, selon la nature du sol, l'heure des mesures et l'état physiologique de la végétation, il est difficile (dans l'état actuel des connaissances) d'utiliser les mesures de réflectivité globale dans des travaux d'amélioration génétique des céréales. Des modifications de l'état hydrique de la végétation peuvent se traduire par un changement notable des propriétés optiques de celle-ci (STANHILL *et al.*, 1972). Des résultats récents (FERGUSON *et al.*, 1972) permettent d'espérer des progrès intéressants en ce sens, car des modifications de couleur du feuillage entraînent des différences importantes de sa température, et en conséquence de son activité photosynthétique nette.

Dans le présent travail, on a montré que le port naturel des Blés modifie significativement leur albedo : il est plus élevé quand le feuillage est érigé, et la pénétration du rayonnement dans la culture peut en être améliorée. Mais une étude systématique, portant sur une gamme importante de cultivars, pendant toute la durée de leur vie, permettrait seule de tirer des conclusions générales.

En fin de végétation, nos résultats de mesure de l'albedo diffèrent notablement de ceux de FUCHS *et al.*, (1972). Les conditions de sol et de milieu sont différentes, et le développement des mauvaises herbes estivales est certainement plus notable à Versailles qu'en Israël.

La plupart des résultats disponibles recoupent les nôtres : la fraction de l'albedo visible est très faible pendant toute la période de végétation active, et celle-ci utilise donc presque toute l'énergie visible incidente (fig. 6 ou 17 par exemple).

Toute *augmentation* de l'albédo sera intéressante en climat *chaud*, car elle diminue l'énergie que les plantes ont à transformer en vapeur d'eau par transpiration ; *il n'en ira pas forcément de même en climat frais*, car on sait que la photosynthèse nette n'est optimale qu'au-dessus d'un certain seuil de température, variable avec les cultivars et les espèces (STOY, 1965 ; PLANCHON, 1971).

L'extinction du rayonnement *visible* est rapide dans la végétation (fig. 18). Il faut que l'énergie globale incidente dépasse 700 W m^{-2} pour que des feuilles situées au-delà d'un LAI de 3 ou 4 puissent manifester une photosynthèse nette positive à l'échelle de temps de la journée. Par beau temps, cette intensité n'est dépassée que 3 à 5 heures par jour à Versailles. Si l'extinction du rayonnement paraît moins rapide par temps couvert, la faible énergie incidente supprime toute photosynthèse notable au-delà de LAI 2 ou 3. Ceci explique que, dans les nombreuses expériences de défoliation rapportées dans la littérature, la suppression de 30 à 50 p. 100 des feuilles ait un effet limité sur le rendement (au moins quand celle-ci a été effectuée *après* l'anthèse : cf. BALDY, 1973 *a*).

Cette extinction entraîne la disparition progressive des talles dominées (par « compétition » pour la lumière) et le mauvais développement des *épis* des talles les plus courtes. Ceci a été mis en évidence dans nos expériences d'association en lignes alternées de paires de cultivars de taille très différente (cf. BALDY, 1973 *d*). L'ombrage continuel des brins les plus courts par les plus longs se traduit aussi par une *réduction* du rapport des masses sèches (Racines/Parties aériennes), qui peut passer de 1/6 (cas normal de Blés d'hiver) à 1/20 seulement.

Ce phénomène doit aboutir à une sélection naturelle défavorable, qui élimine progressivement du peuplement les types les plus courts de la population. Cet effet paraît défavorable, si on en juge par la vogue actuelle des Blés courts ou demi-nains.

L'énergie incidente est donc utilisée essentiellement par les organes supérieurs des Blés, et en particulier par les épis. Les feuilles situées entre LAI 2 et LAI 5 joueront un rôle d'autant plus important que le climat sera plus lumineux, et l'évapotranspiration plus forte (cf. BALDY, 1973 *a* et *c*). Leur photosynthèse nette pourra être importante pour le développement des plantes quand les conditions microclimatiques au niveau des organes supérieurs deviendront défavorables (vers midi notamment) ; mais ceci sera d'autant plus vrai que le port du blé sera plus érigé.

Le travail présenté ici permet d'estimer le rendement de chaque organe par rapport à l'énergie réellement reçue à son niveau au cours de la journée, à condition de pouvoir *mesurer* la photosynthèse dans ces conditions. Une méthode d'étude de celle-ci au champ a été mise au point (BALDY, 1973 *c*). Les premiers résultats sont encourageants.

La connaissance de l'extinction de l'énergie dans le couvert et de l'albedo de celui-ci, constitue un élément *important* dans l'estimation de la productivité exprimée en *masse sèche* totale. Mais la transformation des produits de la photosynthèse au

niveau des épis est très complexe, et la seule étude de la production photosynthétique brute ne peut suffire à expliquer les différences *qualitatives* entre cultivars, comme l'a bien fait remarquer STOY (1965).

La conjonction d'études macrophysiologiques et biochimiques (et notamment l'utilisation, en conditions de milieu bien connues, d'éléments marqués) peut seule, semble-t-il, assurer au généticien les bases scientifiques qui permettront à ce dernier d'accomplir de nouveaux progrès, probablement aussi considérables que ceux déjà obtenus au cours des vingt dernières années.

Reçu pour publication en avril 1973.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE EXTINCTION OF ENERGY OF SOLAR ORIGIN IN POPULATIONS OF COMMON WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L. EM. THELL.)

Studies on the extinction of solar energy in five cultivars of common spring wheat and their albedo, were carried out at Versailles-La Minière in 1970 and 1971, using original linear pyranometers.

Considerable albedo variations (measured between 0.4 and 3.0 μm) are due to the position of the sun and to the relative importance of global and scattered radiations. But the cultivars studied present significantly different albedoes, composed of over 80 p. 100 infra-red (0.75-3.0 μm).

The extinction of incident radiation, under cover, is rapid : when the foliar surface area is greater than 4 to 5 m^2m^{-2}, the residual *visible* energy becomes insufficient during most of the day to assure any notable photosynthesis in the leaves above this level. The bearing of the cultivars is important in this respect : the upper erect leaves allow the light to penetrate better, at least during the middle of the day ; inversely these erect leaves intercept the incidental radiation more effectively during the morning and the evening, when the sun is low on the horizon.

A method of calculating visible energy is proposed from measurements of the global energy taken on the vegetation and the energy output of the wheat crops is calculated. Lines of research are then proposed which are likely to improve the global output of the crops, in dry mass, whilst emphasizing that the knowledge of the photosynthesis processes alone seems insufficient to explain the *qualitative* evolution of the caryopsis reserves.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER EXTINKTION DER SONNENENERGIE IN WEICHWEIZENKULTUREN (*TRITICUM AESTIVUM* L. EM. THELL.)

Das Studiem der Extinktion der Sonnenenergie in fünf Weichweizenpflanzungen von der Sommersorte und ihrer Albedo wurde 1970 und 1971 mit originellen Linearpyranometern durchgeführt.

Die bedeutenden Albedoschwankungen (Messungen zwischen 0,4 und 3 μ m) gehen auf die Lage der Sonne zurück und auf den bedeutenden Anteil der diffusen Strahlung an der Gesamtstrahlung. Aber die Albedo der untersuchten Kulturen weisen bedeutsame Unterschiede auf und bestehen zu mehr als 80 p. 100 aus Infrarotstrahlung (0,75-3,0 μ m).

Die Extinktion der einfallenden Strahlung im Schatten geht rasch vor sich : sobald die Blattoberfläche 4 bis 5 m^2m^{-2} beträgt, wird die remanente *sichtbare* Energie während des Grossteils des Tages zu gering, um für eine bedeutende Photosynthese der über diesem Niveau befin-

dlichen Blätter zu sorgen. Die Stellung der Pflänzchen ist in dieser Hinsicht wichtig : die aufgestellten oberen Blätter lassen das Licht besser durch, zumindest in der Mitte des Tags. Umgekehrt nehmen diese aufgestellten Blätter auch am Morgen das auffallende Licht auf, ebenso am Abend, wenn die Sonne tief am Horizont steht.

Es wird eine Berechnungsmethode der sichtbaren Energie vorgeschlagen. Aus den an der Vegetation vorgenommenen Gesamtenergiemessungen berechnet man die Energieausbeute der Weizenkulturen. Es werden weiterhin Methoden zur Gesamttrockenmassenertragsverbesserungevorgeschlagen, wobei betont wird, dass die Kenntnis des Photosynthesevorgangs allein ungenügend erscheint, um die *qualitative* Entwicklung der Schalfruchtreserven zu erklären.

РЕЗЮМЕ

К. БАЛЬДИ.

К изучению потухания энергии солнечного происхождения в популяциях мягкой пшеницы. (*Triticum aestivum*, L. THIELL.)

Изучение потухания солнечной энергии в пяти культиварах мягкой пшеницы весеннего типа и их альбедо было проведено в Версале-Ля Миниер в 1970-м и 1971-м году с помощью оригинальных линейных пиранометров.

Сильные изменения альбедо (измерявшегося между 0,4 и 3,0 μм) вызваны были положением солнца и относительной величиной рассеянного излучения в излучении общем. Но альбедо изученных культиваров достоверно различны и состоят из более 80-ти % инфракрасных лучей (0,75 - 3,0 μм).

Потухание ниспадающего излучения в покрове протекает быстро : как только листовая поверхность превышает 4 - 5 $м^2м^{-2}$, видимая остаточная энергия становится недостаточной большую часть дня чтобы обеспечить заметный фотосинтез листьев находящихся ниже этого уровня. Важна при этом посадка растений культиваров : поднятые верхние листья лучше пропускают свет, особенно в середине дня. и напротив, перехватывают ниспадающую энергию более эффективно утром и вечером, когда солнце стоит низко.

Предлагается метод вычисления видимой энергии, на основе измерений общей энергии в растительности, и рассчитывается энергетическая продуктивность культур пшеницы, а затем, предлагаются пути иссле дования для улучшения общей продуктивности сухой массы этими культурами и подчеркивается что только познания процессов фотосинтеза недостаточно для об'яснения качественной эволюции запасов зерновки.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BALDY Ch. M., 1972. Sur l'énergie active en photosynthèse. Son utilisation par des Graminées au cours de leur développement. 1re Partie. *Ann. agron.* **23** (6), 685-699.

BALDY Ch. M., 1973 *a*. 2e Partie. *Ann. agron.* **24** (1), 1-31.

BALDY Ch. M., 1973 *b*. Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du Blé. *Ann. agron.* **24** (2), 241-276.

BALDY Ch. M., 1973 *c*. Contribution à l'étude de la photosynthèse apparente du Blé : application de méthodes gravimétriques en conditions naturelles. *Œcol. plant.* **8** (sous presse).

BALDY Ch. M., 1973 *d*. Contribution à l'étude de la croissance de peuplements de Blé tendre (*Triticum aestivum* L. em. THIELL). Étude de l'évolution des relations mutuelles entre organes dans des peuplements purs et des associations en lignes alternées de Blés. *Ann. agron.* (sous presse).

BALDY Ch. M., JONARD P., 1969. Contribution à l'étude du rendement photosynthétique du Blé. *C. R. Acad. Sci.* Paris, Série D, **268**, 1296-1299.

BERDAHL J. D., RASMUSSON D. C. ,MOSS D. N., 1972. Effect of leaf area on photosynthetic rate light penetration, and grain yield in Barley. *Crop Sci.*, **12**, 177-180.

COMBRES J. Cl., BONHOMME R., BALDY Ch., GOILLOT CH., de PARCEVAUX S., 1970. Un pyranomètre linéaire destiné à la mesure du rayonnement sous couvert végétal. in : *Techniques d'étude des facteurs physiques de la biosphère*. I. N. R. A. Éd., Paris, 59-70.

FEEKES, 1941. Cité par KELLER C., BAGGIOLINI M., 1954. Les stades repères dans la végétation du Blé. *Rev. Romande Agric. Vitic. Arboric.* **10**, 17-20.

FERGUSON H., COOPER C. S., BROWN J. H., ESLICK R. F., 1972. Effect of leaf color, chlorophyll concentration and temperature on photosynthetic rates of isogenic Barley lines. *Agron. J.*, **64**, 671-673.

FUCHS M. *et al.*, 1972. Diurnal variations of the visible and near-infrared-reflectance of a Wheat crop. *Israel J. agric. Res.*, **22**, 63-75.

GESLIN H., VERNET A., 1952. Maturation du Blé et climat. *Ann. I. N. R. A.*, Sér. B, 253-256.

MEIDNER H., 1970. Light compensation points and photorespiration. *Nature* (London) **228**, 1349.

NORMAN J. M., MILLER E. E., TANNER C. B., 1971. Light intensity and sunfleck size distribution in plant canopies. *Agron. J.*, **63**, 743-748.

OSMAN Q. M., MILTHORPE F. L., 1971. Photosynthesis of Wheat leaves in relation to age, illuminance and nutrient supply. *Photosynthetica*, **5**, 55-70.

PLANCHON C., 1971. Relation entre l'assimilation chlorophylienne nette, la teneur en chlorophylle *a* et la température chez le Blé tendre (*Triticum aestivum* L.). *C. R. Acad. Sci.*, Sér. D., **272**, 68-71.

PUCKRIDGE D. W., 1972. Photosynthesis of Wheat under field conditions. V. The effect of solar elevation on the distribution of photosynthetic activity within the crop canopy. *Austral. J. agric. Res.*, **23**, 397-404.

STANHILL C. *et al.*, 1972. The effect of fertilizer application on solar reflectance from a Wheat crop. *Israel J. agric. Res*,. **22**, 109-118.

STOY V., 1965. Photosynthesis, respiration and carbohydrate accumulation in spring Wheat in relation to Yield. *Physiol. Plant. Supplementum IV*. 125 pp.

SZEICZ G., 1969. Radiation transmission and foliage area profiles in crops. *Mimeographed. Rothampsted Expt. Sta.*, 37 p.

VANELDEREN E., VANHOÛTEN S. P. J. H., KROEZE G. H., 1972. Short wave radiation in a Wheat crop during the harvest period. *J. agric. Engeng. Res.*, **17**, 94-98.

VARLET-GRANCHER Cl., BONHOMME R., 1971. Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimatologie d'un champ de Maïs. III. Composition spectrale de la lumière dans la culture. *Ann. agron.*, **22**, 515-525.

WARDLAW I. F., 1968. The control and pattern of movement of carbohydrates in plants. *Bot. Rev.*, **34**, 79-105.

Ann. agron., 1973, **24** (5), 533-545.

UNE MÉTHODE DE MESURE DE LA DENSITÉ APPARENTE DE PETITS AGGLOMÉRATS TERREUX. APPLICATION A L'ANALYSE DES SYSTÈMES DE POROSITÉ DU SOL

G. MONNIER, P. STENGEL et J.-C. FIÈS

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

L'analyse de la porosité hétérogène du sol en place nécessite la mesure de la densité apparente sur petits agglomérats. Une technique de mesure basée sur l'imprégnation de l'échantillon par du pétrole est décrite puis examinée par rapport à d'autres techniques et du point de vue de la « fiabilité » de ses résultats.

La méthode est ensuite appliquée à une tentative de description des différents systèmes de porosité d'une série de matériaux meubles agrégés. Il en ressort un renforcement de la notion de porosité texturale et de son intérêt par rapport à l'interprétation de mesures globales concernant l'état physique du sol.

INTRODUCTION

La porosité totale d'un sol, c'est-à-dire la fraction d'un volume apparent unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide permet de caractériser de façon globale et commode l'état physique d'une couche de sol. On sait qu'on la détermine le plus souvent de façon indirecte à partir de mesures de la densité apparente d_a.

Si l'on connaît la densité réelle d_r de la phase solide, la porosité exprimée en p. 100 du volume apparent s'écrit alors :

$$\text{P p. 100} = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) \times 100.$$

La détermination de la densité apparente elle-même revient à mesurer le volume apparent occupé par un poids connu de matériau sec. Pour cela, deux types de techniques peuvent être utilisées :

— Dans le cas de la méthode des anneaux de Kopecki ou de la densitométrie à membrane, on prélève, dans la couche de sol en place étudiée, un volume connu — prédéterminé dans le cas des anneaux, mesuré *a posteriori* à l'aide du densitomètre — de matériau et l'on en détermine le poids après séchage à 105°. Ces méthodes visent à prendre en compte la totalité de la porosité. Aussi, la dimension de l'échantillon doit-elle être relativement importante. Cette condition est mieux réalisée dans le cas de la densitométrie (volume prélevé de l'ordre de 500 à 1 000 cm^3) que dans le cas des anneaux dont les plus fréquemment utilisés ont un volume aliant de 50 à 100 cm^3.

— Dans les techniques du deuxième type, on prélève dans la couche étudiée, des mottes, c'est-à-dire des ensembles de particules élémentaires ou complexes cimentées, suffisamment cohérents pour pouvoir être manipulés commodément ; on en détermine le poids sec et le volume apparent (voluménométrie à mercure, méthode du vernis, etc.). La dimension moyenne du volume-échantillon est nettement plus faible (10 à 30 cm^3 en moyenne) que dans les cas précédents, car il est le plus souvent difficile de trouver des ensembles cohérents de plus grande taille. Par ailleurs, la grandeur effectivement mesurée est, en général, différente : le mode de prélèvement conduit en effet à éliminer la fraction de la porosité totale qui correspond aux fissures délimitant les mottes et aux vides ménagés par l'arrangement des agglomérats de « terre fine » lorsqu'il en existe.

En définitive, dans le premier cas, on apprécie valablement l'ensemble de l'espace poreux excepté lorsqu'il appartient à un système dont la maille est supérieure aux dimensions moyennes des échantillons prélevés ; vides ménagés entre des bandes de labour ou fentes de retraits dans les horizons à structure prismatique grossière par exemple. Les porosités « mottières » ont, au contraire, une signification moins globale. Leur interprétation n'en est pas pour autant plus simple ; il est en effet fréquent que les mottes prélevées contiennent un volume non négligeable de fissures incomplètement développées ou bien des cavités et galeries d'origines diverses.

Notion de système de porosité et objectifs de la méthode proposée

Ces considérations suggèrent que les résultats obtenus par ces différentes méthodes puissent différer de façon importante et systématique. Le tableau 1 rassemble à titre d'exemple quelques éléments de comparaison. Les densités apparentes présentées ont été obtenues dans la couche 12-18 cm d'un terrain limono-argileux cultivé en maïs et présentant, au moment de la mesure, une structure polyédrique grossière. Les mesures de densité apparente mottière, effectuées par la méthode du vernis ont porté, soit sur des mottes telles qu'elles se présentaient au moment du prélèvement, soit sur des séries de mottes triées par tamisage sous alcool dans le but de sélectionner des volumes apparents aussi peu fissurés que possible (MONNIER et TRI, 1972). La dernière colonne correspond dans ce sens à un cas extrême : il s'agit de mottes fabriquées à partir du matériau étudié, de telle sorte qu'elles présentent une structure véritablement continue et homogène.

On peut enregistrer une augmentation considérable de densité apparente et une

diminution correspondante de porosité lorsqu'on passe des valeurs obtenues sur des volumes importants et en place à des valeurs déterminées sur mottes. Dans ce dernier cas, la porosité diminue au fur et à mesure que l'on a affaire à des volumes apparents à structure interne plus continue. Enfin, on constate que les écarts types des résultats diminuent parallèlement jusqu'à devenir négligeables sur mottes artificielles.

TABLEAU I

Comparaison des différentes mesures de la densité apparente (1)

Type de mesure	Densité apparente globale de la couche	Mottes naturelles	Densité apparente « mottière »			Mottes artificielles à structure continue
Échantillon	Sol en place		Mottes sélectionnées par tamisage à l'alcool éthylique			
			1 (2)	2 (2)	3 (2)	
Volume moyen de l'échantillon	600 cm³	10-15 cm³	2 à 8 cm³			10 cm³
Méthode de mesure	Densitométrie à membrane		Méthode du vernis			
d_a moyen	1,47 ± 0,07	1,66 ± 0,03	1,69	1,72	1,76	1,77 ± 0,01
Porosité correspondante (%)	46,4	39,6	38,6	37,5	36,0	35,6

(1) Toutes les mesures ont porté sur un matériau sec ou à une humidité nettement inférieure à sa limite de retrait. Les valeurs indiquées correspondent à des moyennes de 6 mesures pour la densitométrie à membrane et de 12 mesures dans le cas des différentes catégories de mottes.

(2) La série 1 correspond à des mottes sélectionnées par tamisage sous alcool sans agitation préalable. Les séries 2 et 3 ont subi avant tamisage des agitations respectivement modérée (2) et énergique (3).

Nous ne discuterons pas ici de l'intérêt que présente vis-à-vis de l'analyse des systèmes de porosité du sol l'exploitation systématique des différences illustrées par le tableau. Cela a été étudié par ailleurs dans le cas particulier de sols sous prairie (Bui Huu Tri et Monnier, 1973), et fera, dans le cas général, l'objet d'une publication ultérieure. Nous nous bornerons à définir brièvement les différents systèmes de porosité qui participent à la porosité totale d'une couche de sol en place.

A l'échelle macroscopique ou sub-macroscopique, les mottes ou les éléments structuraux sont délimités par un réseau plus ou moins complexe de fissures qui constituent un premier système de porosité intersticielle. A ce premier type d'espace poreux, viennent s'ajouter des galeries, cavités, alvéoles et des éléments de fissures imparfaitement développés à l'intérieur des mottes ou des éléments structuraux. On peut qualifier cet ensemble de *porosité structurale*. Celle-ci est la seule qui soit

décelable lors de l'examen des profils sur le terrain. A l'échelle de l'assemblage élémentaire, la disposition relative des particules argileuses, limoneuses, sableuses ou organiques ménage un deuxième système de porosité que, du fait de son origine, nous qualifierons de *porosité texturale*. On conçoit l'intérêt que présente la détermination de cette dernière vis-à-vis de l'analyse du système résultant de la superposition de ces différents types de porosité.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans ce but.

— On peut d'abord s'efforcer de conférer artificiellement au matériau une structure continue homogène et pratiquer les mesures de densité apparentes mottières sur les échantillons obtenus. C'est la méthode utilisée dans de nombreuses études expérimentales récentes (KHEYRABI et MONNIER, 1968 ; FIÈS, 1970 ; CUADRADO, FIÈS et MONNIER, 1971 ; FIÈS, 1971 ; FAURE et FIÈS, 1972 ; FIÈS, HÉNIN et MONNIER, 1972).

La difficulté réside dans le mode de préparation des mottes artificielles. D'une part, il convient d'éviter, au cours des phases de dessiccation, les fissurations susceptibles de se manifester dans le cas des matériaux argileux. D'autre part, cette méthode implique qu'à une constitution physique donnée, corresponde un type d'assemblage élémentaire déterminé. Cela a été indirectement vérifié dans de nombreux cas (KHEYRABI et MONNIER, 1968) et le tableau 1 fournit un élément supplémentaire en faveur de cette hypothèse de travail. Il reste que la généralité de ce principe dont la portée théorique et pratique serait considérable, en physique du sol et en pédologie notamment, n'est pas établie.

— On pourrait aussi imaginer une méthode utilisant les possibilités de sélection de mottes naturelles à structure continue, offertes par un tamisage dans l'alcool éthylique (tabl. 1). Toutefois, un tel procédé ne serait pas applicable à des terres très argileuses dont le gonflement dans l'alcool éthylique est suffisant pour entraîner une fragmentation extrêmement poussée des mottes ou éléments structuraux (ES SIFAOUI, 1971). Par ailleurs, la porosité ainsi obtenue resterait sensiblement supérieure à la porosité texturale chaque fois qu'il existe un réseau de porosité structurale formé de canalicules ou d'alvéoles qui persiste à l'intérieur des éléments extraits par traitement à l'alcool éthylique.

— On peut enfin estimer que des mesures de densité apparente pratiquées sur des agglomérats suffisamment petits, doivent permettre d'éliminer la plus grande partie de la porosité structurale, en portant sur des volumes assimilables à une association continue et homogène d'assemblages élémentaires. Le problème à résoudre consiste alors à mesurer le volume apparent d'agglomérats dont les dimensions sont de l'ordre du millimètre, les méthodes du vernis et l'utilisation du voluménomètre à mercure étant de ce fait impraticables.

Nous avons eu recours pour cela à une variante de la technique de porosimétrie au pétrole sur mottes décrite par HÉNIN *et al.* (1969).

Nous examinerons successivement :

— la mise au point du mode opératoire,
— la comparaison des résultats obtenus par différentes méthodes,
— l'adéquation de la méthode proposée au but général poursuivi.

I. — MODE OPÉRATOIRE

Le principe général de la méthode est le suivant :

On sature par un liquide convenablement choisi, la porosité d'un échantillon de la terre étudiée, de poids sec connu et l'on mesure son volume apparent par pesée hydrostatique dans le même liquide.

En réalité, il suffit que le remplissage de la porosité atteigne un taux qui ne soit pas susceptible d'être dépassé lors de l'immersion au cours de la pesée hydrostatique.

Quant au liquide utilisé, il doit satisfaire aux trois exigences suivantes :

— présenter des propriétés de tension superficielle et d'affinité pour les matériaux terreux permettant une pénétration suffisamment facile et rapide,

— ne pas provoquer de gonflement des colloïdes du sol et donc d'accroissement du volume apparent des agglomérats,

— être assez peu volatil pour que les pertes de poids par évaporation au cours de la mesure soient négligeables.

Nous avons utilisé un pétrole de commerce qui s'est avéré convenable de ce triple point de vue.

A. — *Imprégnation et ressuyage des agglomérats*

L'échantillon est constitué par environ 2 g d'agglomérats, de taille comprise entre 2 et 3 mm, extraits par broyage ménagé et tamisage à sec de la terre étudiée. Il est déposé sur un panier à fond plat en toile métallique fine, de dimensions suffisantes pour que les agglomérats soient disposés en une seule couche. Le panier est alors placé dans une coupelle contenant du pétrole, pendant au moins une heure, de façon à obtenir un taux de remplissage des pores suffisamment stable (1).

A la sortie de la coupelle, il convient d'éliminer l'excès de pétrole présent à l'état de film autour des agglomérats, et de ménisques à leurs points de contacts. Cette opération est indispensable en raison de la grande surface volumique des agglomérats (un film résiduel de pétrole de 0,01 mm d'épaisseur entraînerait une surestimation du volume de l'ordre de 3 p. 100) ; par ailleurs, elle doit être conduite en évitant de vider les plus gros pores.

Un résultat satisfaisant peut être obtenu par contact de durée limitée avec un papier-filtre ou un verre fritté de porosité moyenne (billes de 50 μ de diamètre). L'expérience a montré que le ressuyage doit être interrompu dès que la surface des agglomérats, brillante au départ, devient mate.

B. — *Mesure du volume des agglomérats ressuyés*

Ce volume est déterminé par une mesure de poussée hydrostatique exercée sur l'échantillon immergé avec son panier dans le liquide d'imprégnation. Compte tenu de l'ordre de grandeur du volume à mesurer, la pesée doit être effectuée au mg près.

Si P est la poussée enregistrée sur l'ensemble panier + échantillon, P_0 la pous-

(1) L'imprégnation sous vide à laquelle nous avons comparé la technique ci-dessus n'a pas apporté de sécurité supplémentaire à la mesure.

sée qui s'exerce sur le panier seul, p le poids de l'échantillon sec et d la densité du liquide de mesure (1), la densité apparente d_a de l'échantillon est donnée par la relation :

$$d_a = p \times \frac{d}{P - P_0}.$$

C. — *Précision des mesures*

a) *Erreurs de pesée.*

Si $\frac{\Delta p}{p}$ est négligeable dans les conditions décrites ici, il n'en est pas de même en ce qui concerne $\frac{\Delta(P - P_0)}{P - P_0}$ qui est de l'ordre de 0,5 p. 100 pour une erreur de 2 mg sur chacune des deux pesées. Il convient donc d'opérer soigneusement.

b) *Erreurs au cours de la manipulation.*

Il est facile d'éviter toute perte de matériau entre la pesée initiale et la mesure finale de poussée d'Archimède. Par ailleurs, l'expérience a montré que l'opération du ressuyage, si délicate qu'elle paraisse, n'était pas une source d'erreurs gênantes.

c) *Distribution des mesures.*

Le tableau 2 rassemble les moyennes obtenues sur la mesure par échantillon et leur écart type pour 4 types différents de matériaux.

On peut constater que la reproductibilité est excellente, l'écart type de la distribution des mesures étant toujours inférieur à 1 p. 100 et, dans trois cas sur quatre, inférieur à 0,5 p. 100.

TABLEAU 2

Moyennes et écarts types de densités apparentes mesurées sur agglomérats de 2 à 3 mm (1)

	Limon blanc	Limon rouge	Limon argileux	Terre argileuse lourde
Moyennes sur dix mesures	1,630	1,771	1,791	1,913
Écarts types	0,021	0,008	0,006	0,005

(1) Il s'agit ici d'agglomérats « artificiels » extraits par broyage et tamisage à sec de gâteaux constitués à partir de mottes artificielles fabriquées par la technique décrite par KHEYRABI (1966).

II. — COMPARAISON AVEC DES MÉTHODES DE MESURES SUR MOTTES

Nous avons comparé les résultats ci-dessus avec ceux obtenus par deux autres méthodes :

— la méthode classique au vernis,

— la méthode au pétrole,

(1) Dans le cas du pétrole que nous avons utilisé, $d = 0{,}780$.

appliquées à des mottes artificiellement constituées à partir des différents matériaux étudiés suivant la technique définie par KHEYRABI et MONNIER (1968).

Le but poursuivi était d'une part, de juger des résultats de la méthode au pétrole pratiquée sur mottes par rapport à la méthode au vernis, d'autre part, d'examiner la validité d'application de la première à des petits agglomérats.

Le tableau 3 permet de comparer les moyennes et écarts types de 10 mesures de densité apparente obtenues sur les quatre matériaux du tableau 2 par les trois méthodes.

TABLEAU 3

Comparaison de trois méthodes d'évaluation de la densité apparente texturale (1)

Méthode		Limon blanc		Limon rouge		Limon argileux		Terre argileuse	
		d_a	σ	d_a	σ	d_a	σ	d_a	σ
Vernis	sur mottes artificielles 3 cm	1,585 (98,5)	0,038	—	—	1,773 (99,3)	0,012	1,859 (97,1)	0,007
Pétrole		1,609 (100)	0,044	1,768 (100)	0,009	1,786 (100)	0,012	1,914 (100)	0,006
Pétrole sur agrégat 2-3 mm		1,630 (101,3)	0,021	1,771 (100,2)	0,008	1,791 (100,3)	0,006	1,913 (100)	0,005

(1) Entre parenthèse : valeurs moyennes de densité apparente indexées sur la moyenne des mesures sur mottes au pétrole = 100 pour chaque terre étudiée.

On peut constater que, d'une manière générale, les densités apparentes mesurées, souvent très différentes d'un sol à l'autre, ne varient pas de plus de 3 p. 100 selon la méthode utilisée.

Toutefois, les écarts types des mesures sur mottes sont, quelle que soit la technique de préparation, supérieurs aux écarts types des mesures sur agglomérats.

Par ailleurs, les mesures sur mottes vernissées conduisent à des densités apparentes plus faibles que les mesures après imbibition au pétrole : ceci est particulièrement net pour la terre argileuse.

On peut raisonnablement considérer que cette différence correspond à une erreur systématique sur vernis. Ce dernier est en effet visqueux et, de ce fait, le film qui entoure la motte après le trempage n'est que lentement absorbé, particulièrement dans le cas des matériaux à texture fine. Le vernis séchant assez vite, le volume de la motte peut se trouver augmenté du produit de l'épaisseur du film résiduel par la surface apparente de la motte. Dans le cas d'une motte cubique de 2 cm d'arête, la présence d'une couche de vernis de 0,1 mm entraînerait une surestimation du volume et donc, une sous-estimation de la densité apparente de l'ordre de 3 p. 100, erreur voisine de celle qui est enregistrée ici, dans le cas le plus défavorable.

Enfin, la comparaison entre les résultats obtenus par la méthode au pétrole,

d'une part, sur mottes artificielles à structure continue homogène, d'autre part, sur agglomérats de 2 à 3 mm de diamètre, issus de ces mottes, montrent que les difficultés liées à la manipulation de nombreux petits agglomérats ont pu être surmontées. En particulier, le mode de préparation proposé a permis d'éviter ces deux erreurs possibles : surestimation du volume par ressuyage insuffisant ou sous-estimation par ressuyage excessif.

En conclusion, la méthode est satisfaisante d'un point de vue technique : elle permet en effet d'obtenir, avec un écart type ramené à la moyenne, inférieur à 2 p. 100, des valeurs de densités apparentes en général très peu différentes de celles qui sont obtenues par des méthodes classiques telles que la méthode au vernis. Lorsqu'il existe une différence, on peut même estimer, au vu des résultats que nous avons présentés, que les valeurs obtenues sur petits agglomérats sont plus conformes à la réalité.

III. — SIGNIFICATION GÉNÉRALE DE LA DENSITÉ APPARENTE DE PETITS AGGLOMÉRATS

Il nous reste maintenant à examiner dans quelle mesure les valeurs de densité apparente obtenues par la méthode décrite — mais cette fois sur des agglomérats de petite taille « naturels » c'est-à-dire extraits par broyage ménagé et tamisage à sec de mottes et (ou) de terre fine prélevées en place — peuvent avoir la signification d'une densité apparente texturale, c'est-à-dire traduire la conséquence d'un arrangement essentiellement déterminé par la constitution physique du matériau.

Pour cela, nous avons évalué, par la méthode décrite, la densité apparente de deux sortes d'échantillons :

— des séries d'agglomérats naturels extraits de sol en place, de dimension 2R s'échelonnant de 4 cm à 1,5 mm en moyenne de classe,

— des gâteaux, préparés à partir du même matériau, par la technique utilisée pour la fabrication des échantillons dont la densité apparente figure au tableau 3.

La comparaison des résultats de ces différentes séries de mesures ressort des figures 1 à 4 sur lesquels sont portées, en ordonnée, les variations de d en fonction de $1/R$ cm^{-1}, en abscisse.

Pour chacun des quatre matériaux étudiés, la densité apparente « texturale » déterminée par la méthode au pétrole sur gâteaux artificiels, est représentée par une droite d'ordonnée correspondante, parallèle à l'axe des $1/R$: nous avons vu, en effet, (tabl. 3) que les résultats obtenus sur des échantillons à structure continue homogène étaient indépendants de la taille des fragments sur lesquels était effectuée la mesure. Nous avons, de plus, concrétisé sur le graphique la variation de densité apparente texturale correspondant à l'écart type de la distribution des mesures. Enfin, pour chaque valeur de $1/R$ figure l'intervalle total des variations de densité apparente enregistrées.

On peut constater que, pour trois sols sur quatre, les valeurs moyennes de densité apparente obtenues augmentent lorsque la taille des fragments soumis à la mesure

diminue. Parallèlement, on enregistre une diminution de la variabilité des mesures que l'on peut interpréter comme résultant simultanément :

— d'un meilleur échantillonnage au niveau de chaque mesure : le nombre de fragments constituant le volume échantillon croît en raison inverse de leur taille,

— de la diminution progressive de la porosité structurale la plus hétérogène.

Dans le cas des sols 1 et 2, les valeurs croissantes de densité apparente paraissent tendre asymptotiquement vers la densité apparente « texturale » obtenue sur échantillons artificiels.

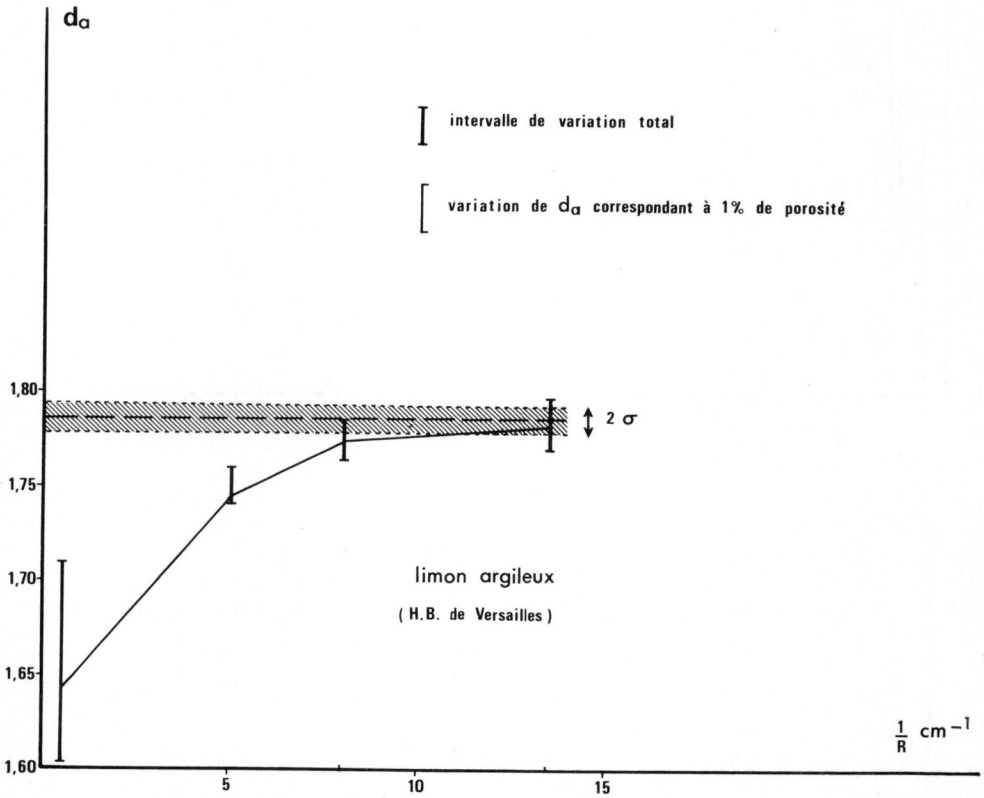


FIG. 1. — *Limon argileux*

FIG. 1, 2, 3 et 4. — *Variation de la porosité des mottes de différentes terres en fonction de leur taille*

Pour le sol n° 4, cette dernière est nettement inférieure ; il semble qu'on trouve ici une illustration des difficultés rencontrées à réaliser artificiellement des structures continues homogènes, c'est-à-dire sans fissuration, dans le cas des matériaux très argileux à gonflement apparent important. La densité apparente texturale est vraisemblablement sous estimée ici sur échantillon artificiel, en raison de la présence de 4 ou 5 p. 100 de porosité structurale sous forme de fissures apparues au cours de la préparation du gâteau.

Pour le dernier sol (n° 3), la densité apparente des fragments ne varie pas en

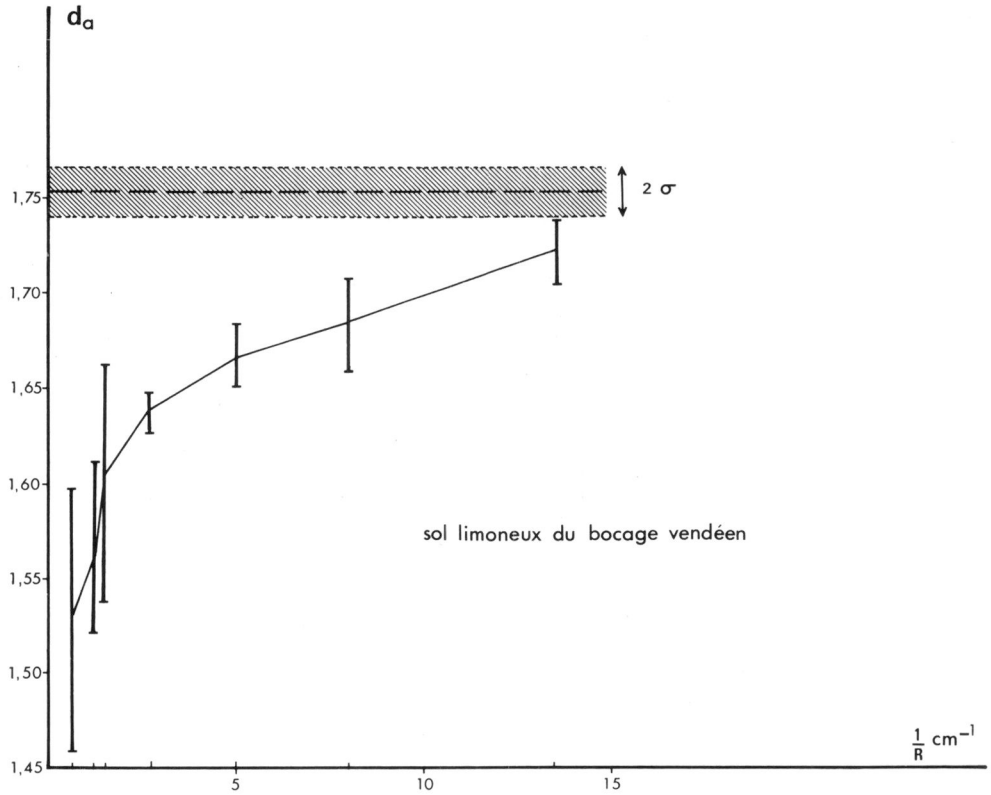


FIG. 2. — *Sol limoneux*

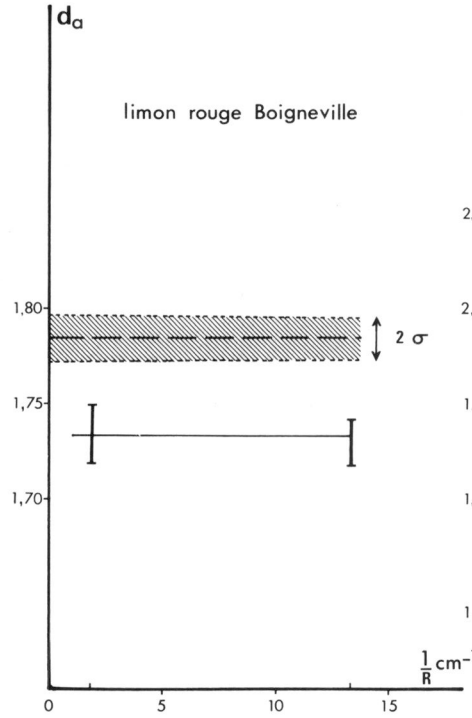


FIG. 3. — *Limon « rouge »*

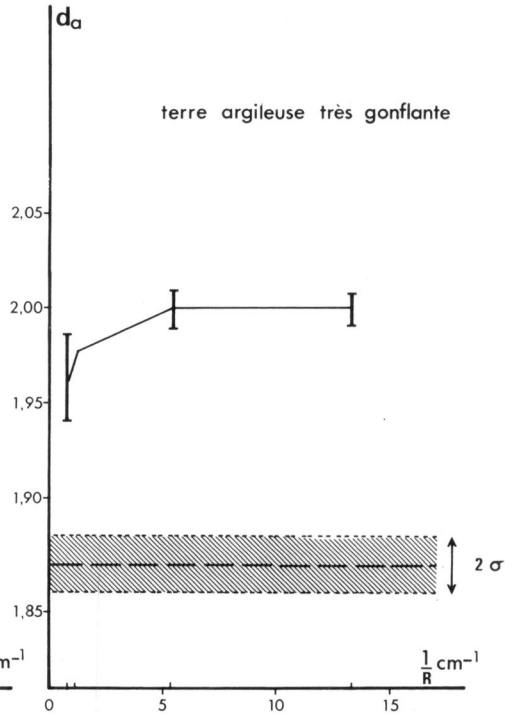


FIG. 4. — *Terre argileuse gonflante*

fonction de leur taille et se maintient à une valeur constante légèrement inférieure à la densité apparente texturale évaluée sur gâteaux. L'écart enregistré correspond approximativement à 2 p. 100 de porosité. Il est donc peu important, bien que significatif. Son interprétation pourrait être liée à un réseau de porosité de canalicules de maille très réduite, observable à la loupe sur ce limon rouge. Notons qu'il ne paraît pas raisonnable de chercher à éliminer ce système très serré de porosité structurale en opérant sur des agglomérats encore plus petits. L'expérience montre, en effet, que les mesures sur des agglomérats d'un diamètre moyen inférieur à 2 mm sont fréquemment entachées d'erreurs liées à l'élimination défectueuse du film de pétrole, au cours du ressuyage.

CONCLUSION

Les conclusions que l'on peut tirer des résultats qui viennent d'être présentés et discutés sont de deux ordres :

— D'un point de vue technique tout d'abord, il apparaît possible et souvent même, souhaitable, de substituer à la méthode de mesure de densité de mottes par enrobage au vernis, une méthode par imprégnation de pétrole. Non seulement cette dernière donne des résultats plus sûrs dans le cas des terres à pores très fins (terres argileuses), mais elle est applicable à de petits agglomérats, ce qui ne saurait être envisagé avec les vernis actuellement disponibles.

— D'un point de vue plus fondamental, il apparaît que l'analyse des différents systèmes participant à la porosité globale d'un sol en place est grandement facilitée par la possibilité, démontrée ici, de déterminer la porosité sur des volumes apparents de sol suffisamment petits. Dans de nombreux cas, la convergence entre les résultats de porosité obtenus sur de tels volumes et ceux obtenus sur des structures continues homogènes constituées par le même matériau, consolide la notion de porosité texturale, tout en fournissant, pour celle-ci, une méthode d'évaluation qui n'est plus entachée de la part d'arbitraire et des risques d'erreurs liés à la préparation des structures continues artificielles dans la technique utilisée jusqu'ici.

Reçu pour publication en avril 1973.

SUMMARY

A METHOD OF MEASURING THE APPARENT DENSITY OF SMALL EARTHY AGGLOMERATES. ANALYSIS OF SOIL POROSITY SYSTEMS

The analysis of heterogenous porosity of soil, in the field, necessitates measuring the apparent density of small agglomerates. A measuring technique based on the impregnation of the sample with petroleum is described and examined in relation to other techniques and from the point of view of the practicability of results.

The method is then applied to an attempt at describing different systems of porosity of a series of aggregate light materials. From this there results the notion and advantage of textural porosity in relation to the interpretation of global measures concerning the physical condition of the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE MESSMETHODE DER SCHEINBAREN DICHTE VON KLEINEN ERDAGGLOMERATEN ANWENDUNG AUF DIE ANALYSE DER POROSITÄTSSYSTEME DES BODENS

Die Analyse der heterogenen Porosität des Bodens erfordert die Messung der scheinbaren Dichte der kleinen Agglomerate. Eine auf der Durchtränkung der Probe mit Petroleum beruhende Methode wird beschrieben und dann mit anderen Methoden in bezug auf Verlässlichkeit und Resultate verglichen.

Diese Methode wird dann auf einen Versuch der Beschreibung der verschiedenen Porositätssysteme von aufgehäuften lockeren Materialien angewandt. Dabei wird der Begriff der texturalen Porosität bekräftigt und seine Bedeutung bei der Auswertung der Globalmessungen betreffend den physikalischen Zustand des Bodens.

РЕЗЮМЕ

Г. МОННЬЕ, П. СТЕНЖЕЛЬ, Ж. К. ФИЕС.

Метод измерения видимой плотности небольших почвенных агломератов Применение анализа систем порозности почвы.

Для того чтобы иметь возможность анализировать гетерогенную порозность почв на месте, необходимо провести измерения видимой плотности небольших ее агломератов. Данная работа описывает технику этого измерения, основанную на пропитывании образца керосином, и рассматривает полученные результаты по сравнению с другими приемами, и с точки зрения их надежности.

Метод затем применяется при попытке описания разных систем порозности серии рыхлых, комковатых материалов. Результаты приводят к усилению понятия механической порозности и интереса этого понятия для интерпретации общих измерений физического состояния почвы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bui Huu Tri, Monnier G., 1973. Étude quantitative de la granulation des sols sous prairie de graminées. I. Paramètres définissant la structure granulaire et leur relation avec la porosité du sol. *Ann. agron.*, **24** (4).

Cuadrado Sanchez S., Fiès J.-C., Monnier G., 1971. Influence de la nature minéralogique de la fraction limoneuse sur la stabilité structurale des sols. *Sci. Sol*, 2, 27-35.

Es Sifaoui A., 1971. *Étude expérimentale de l'évolution de la structure des sols au cours de leur dessiccation.* Thèse de Doctorat de spécialité, Université Paul-Sabatier, Toulouse.

Faure A., Fiès J.-C., 1972. Étude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. *Ann. agron.*, **23** (3), 317-332.

Fiès J.-C., 1970. Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. *Sci. Sol*, 2.

FIÈS J.-C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. agron.*, **22** (6), 655-685.

FIÈS J.-C., HÉNIN S., MONNIER G., 1972. Étude de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles. *Ann. agron.* **23** (6), 621-655.

HÉNIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. *Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques.* Masson et Cie, Paris.

KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Étude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. agron.*, **19** (2), 129-152

MONNIER G., BUI HUU TRI, 1972. Une méthode d'évaluation de la taille des éléments structuraux du sol. *Bull. A. F. E. S.*, 2, 17-27.

Ann. agron., 1973, **24** (5), 547-569.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE SURFACE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE DES SOLS : INTERACTIONS SUBSTANCES HUMIQUES-ÉTHYLÈNE-GLYCOL

J. GUYOT (1), J. DEJOU (2) et Ph. LAMY

Station d'Agronomie, I. N. R. A.,
36000 Châteauroux

RÉSUMÉ

On a étudié, pour divers types de sols, l'importance de la rétention d'éthylène-glycol par la matière organique et chacun de ses principaux constituants. Des relations entre l'ampleur de cette rétention et les valeurs de certains éléments (acidité totale-taux d'humification) ont été enregistrées.

On a, également, souligné l'influence de la nature des cations échangeables (humates métalliques) dans les phénomènes de rétention (glycol) et d'adsorption (H_2O, C_4H_{10}).

Une interprétation des résultats expérimentaux a été effectuée pour tenter de définir les types de liaison participant à l'interaction matière organique-glycol. Bien que de nombreuses incertitudes subsistent quant à la disposition des molécules polaires à la surface des particules de matière organique, il paraît possible, cependant, d'employer la méthode de rétention de glycol pour mesurer, d'une façon très approximative, la surface du matériau organique des sols.

I. — INTRODUCTION

Les études consacrées à la rétention de molécules organiques douées d'une forte polarité, par les particules des phases fines des sols ont été surtout entreprises dans le but d'obtenir une meilleure connaissance des phénomènes impliquant des interactions, d'énergies plus ou moins élevées, entre les charges électriques de ces molécules polaires et celles présentes à la surface des argiles.

Cette technique permettait, par ailleurs, d'évaluer la surface spécifique des minéraux argileux (DYAL et HENDRICKS, 1950). Toutefois, avant toute mesure de

(1) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 21034 Dijon Cédex.
(2) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, 63100 Clermont Ferrand.

la rétention, ces auteurs conseillaient d'éliminer des phases fines, par les moyens appropriés, les éléments susceptibles de perturber la détermination des aires des surfaces ($CaCO_3$, oxydes de fer, matière organique).

Dès 1952, BOWER et GSCHWEND constatent que la destruction de la matière organique d'un échantillon d'argile ou de sol provoque une diminution assez sensible de la rétention d'éthylène-glycol.

Plus récemment, BURFORD *et al.* (1964) observent, pour un échantillon de limon d'Urrbrae (Australie), une augmentation de la quantité de bromure de cétylpyridinium fixé, en corrélation avec un accroissement des teneurs en matière organique.

GUYOT (1969), traitant par des volumes croissants de H_2O_2, un échantillon d'argile extrait de sols noirs, très humifères, de la région d'Eymoutiers (Haute-Vienne), met en évidence une compétitivité de la matière organique et de la fraction $< 2\ \mu$ pour la fixation de l'éthylène-glycol.

Il semble donc que les composés humiques des sols, possèdent la faculté de fixer des molécules organiques, et notamment le glycol.

L'objet de cette étude sera d'une part, d'apprécier la capacité de rétention du glycol par la matière organique et chacun de ses principaux constituants (acides fulviques, humiques et hymatomélaniques, humine), d'autre part, d'essayer de définir les facteurs régissant cette adsorption.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. — *Matériel étudié*

Les échantillons ont été prélevés dans les horizons A_0A_1 et A_1 de sols de différents types, relativement bien pourvus en matière organique.

1. *Sols bruns acides très humifères.*

Ils ont été décrits par DEJOU *et al.* (1968, 1969).

a) *E_y 11-1.* — Sol brun acide, très noir, sous lande à callune, avec 12 p. 100 de matière organique (C/N = 14,6) (Le Rabaseix, Haute-Vienne).

b) *E_y 18-1.* — Sol brun acide, noir, sous cultures variées, avec 10 p. 100 de matière organique et C/N = 13 (Augne, Haute-Vienne).

c) *Sert.* — Sol brun acide, très noir, sous prairie, avec 12 p. 100 de matière organique et C/N = 13,4 (région de Bourganeuf, Creuse).

2. *Sol sablo-argileux humifère de la Brenne* (région de Neuillay-les-Bois) avec 9 p. 100 de matière organique et C/N = 15.

3. *Sol brun calcimorphe de Champagne berrichonne* avec 7 p. 100 de matière organique et C/N = 10,9.

4. *Terre de Groie*, argilo-calcaire du Poitou à 5,3 p. 100 de matière organique et C/N = 9,03.

Tous ces échantillons de sols, après avoir été séchés à l'air, sont tamisés pour éliminer les particules supérieures à 315 μ qui contiennent peu de matière organique.

Ceux du sol brun calcimorphe et de la terre de Groie ont été préalablement décalcifiés avec HCl N/10.

B. — *Méthodes mises en œuvre*

1. *Séparation densimétrique.*

Le fractionnement densimétrique de la matière organique, suivant la technique proposée par MONNIER *et al.* (1962) a été pratiqué sur chaque échantillon de sol, en utilisant deux solutions de densités différentes : 2 et 1,75, cette dernière solution permettant une séparation plus sélective de la matière organique « libre », c'est-à-dire la matière organique fraîche, peu humifiée (HÉNIN et TURC, 1950).

La fraction dense comprend, en principe, essentiellement la matière organique, dite humifiée, dont une grande partie reste encore fixée aux phases fines.

2. *Extraction des constituants humiques.*

Cette opération est effectuée, à la fois sur les échantillons de chaque sol, et sur chacune des fractions densimétriques obtenues préalablement.

La solubilisation des constituants humiques (acides fulviques et humiques) a été obtenue d'une part, selon la méthode au pyrophosphate de Na (DUCHAUFOUR et JACQUIN, 1966), d'autre part à l'aide d'une solution de 0,1 N KOH, dans laquelle on ajoute K_2SO_4 (0,1 g pour 10 g de terre) afin d'améliorer la précipitation des colloïdes minéraux.

La solution surnageante recueillie est ensuite acidifiée à pH 1 par H_2SO_4, pour séparer les acides humiques des acides fulviques. Ces derniers sont ensuite extraits, sous forme de fulvates de sodium (après concentration et alcalinisation de la solution d'extraction) (KONONOVA, 1961 ; Thérèse DUPUIS et JAMBU, 1969).

Les acides humiques et les fulvates sont ensuite purifiés (Thérèse DUPUIS *et al.*, 1970) pour réduire le taux de cendres, puis séchés sous vide à 35°C.

Les teneurs en acides humiques et fulviques présents dans ces divers échantillons ont été déterminées selon les modalités préconisées par DUCHAUFOUR et JACQUIN (1966).

Les acides hymatomélaniques ont été extraits, à chaud, par l'éthanol (Thérèse DUPUIS *et al.*, 1970), purifiés, puis séchés sous vide à 35°C.

Le résidu non extractible par le pyrophosphate de Na ou KOH est séché à 70°C. Dans les échantillons des sols et les fractions denses, il est constitué d'acides humiques, parfois très polymérisés, liés intimement à la fraction minérale des sols. On le désigne par le nom d'humine.

3. *Estimation du taux de matière organique et de ses composés.*

Les proportions de matière organique, d'acides fulviques, humiques et hymatomélaniques, d'humine présents dans ces échantillons sont établies à partir de la méthode Anne (ANNE, 1945).

Les taux de matière organique, obtenus à partir de ce dosage, ont été confirmés par l'analyse thermogravimétrique (GUYOT *et al.*, 1971).

4. *Détermination de l'acidité totale dans la matière organique.*

L'acidité totale provenant des groupements carboxyles (aromatiques et aliphatiques) et hydroxyles (phénoliques principalement) est estimée à partir de la méthode à la baryte ($Ba(OH)_2$).

On utilise par contre $Ca(CH_3COO)^2$ pour déterminer l'acidité due aux groupements carboxyles seuls (SCHNITZER et GUPTA, 1965).

Tous les résultats sont exprimés en méq/g de matière organique.

L'acidité provenant des groupements hydroxyles (phénoliques ou alcooliques) est ensuite évaluée à partir de la différence entre l'acidité totale et l'acidité des groupements carboxyles.

5. *Capacité d'échange de cations.*

Elle a été appréciée à partir de la méthode à l'acétate d'ammonium à pH 7 (METSON, 1956).

6. *Rétention d'éthylène-glycol par la matière organique.*

La technique utilisée est celle de BOWER et GOERTZEN (1959). Elle a été appliquée aux échantillons de chaque sol, de chaque fraction densimétrique et de constituants organiques extraits.

7. *Adsorption de molécules d'H_2O.*

Des acides humiques et des humates métalliques (homoioniques), préalablement séchés, sont placés à la température de 20°C dans des dessiccateurs contenant un mélange $H_2O + H_2SO_4$, de densités variables.

Ces échantillons sont pesés après 14 jours de contact.

8. *Adsorption de* C_4H_{10}.

On a utilisé la technique B. E. T. d'adsorption, en système statique.
Le dégazage habituellement pratiqué à 100°C pour les minéraux argileux, ne peut être effectué qu'à la température maxima de 70°C afin d'éviter les risques de carbonisation.

III. — INTERACTIONS ÉTHYLÈNE-GLYCOL-MATIÈRES ORGANIQUES

A. — *Généralités*

GREENLAND (1965) établit la liste des forces, d'origines diverses, qui sont impliquées dans les interactions entre les argiles et les composés organiques. Le point commun entre ces matériaux minéraux et organiques réside dans l'existence de charges négatives (ionisation des fonctions acides et phénoliques pour la matière organique).

C'est pourquoi la fixation des molécules polaires d'éthylène-glycol par ces dernières substances peut apparaître comme un phénomène de surface, au même titre que celui observé pour les argiles.

Toutefois, par suite des différences de propriétés physiques et chimiques et de configuration de surfaces entre ces composés organiques et minéraux, la disposition des molécules de glycol à la surface de ces matériaux ne présente pas le même arrangement, bien qu'on puisse envisager des mécanismes de fixation identiques.

On sait que la matière organique est constituée par un mélange de composés à chaînes linéaires et cycliques.

VISSER (1963) indique que les acides humiques se présentent sous forme de particules approximativement sphériques.

Les acides fulviques peuvent être comparés à des acides humiques dont le poids moléculaire serait plus faible et dont la totalité de l'oxygène est lié aux groupements fonctionnels, contre 50 à 70 p. 100 pour les acides humiques (PRÉVOT, 1971).

Quel sera le comportement de chacun de ces constituants vis-à-vis du glycol ? Pour répondre à cette question, des essais de rétention de glycol ont été effectués sur un grand nombre d'échantillons de matériaux organiques.

B. — *Rétention de l'éthylène-glycol par les composés humiques des sols*

Sur le tableau 1, ont été portées les quantités de glycol fixées par les acides fulviques et humiques extraits des sols et des fractions densimétriques.

Les quantités de glycol fixées par la matière organique totale (MO) et les composés (R) restant dans les culots d'extraction sont estimées par différence de rétention de glycol entre le matériau organo-minéral et le matériau minéral seul, après élimination de la matière organique par péroxydation ou chauffage.

De l'examen de ce tableau, on peut dégager les constatations suivantes :

a) *La matière organique* présente dans la terre fine de ces sols, retient entre 200 et 270 mg/g de glycol. Celle des sols bruns noirs (E*y* 11-1 et E*y* 18-1) révèle une capacité de rétention un peu plus élevée que celle constatée pour les autres types de sol.

Pour les fractions libres (dé $< 1{,}75$) dans lesquelles la matière organique est

TABLEAU I

Quantités de glycol (en mg/g) *retenues par la matière organique et ses principaux constituants pour divers types de sols*

Type de sol	Terre fine				Fraction dé < 2				Fraction dé > 2				Fraction dé < 1,75				Fraction dé > 1,75			
	MO	AH	AF	R	MO	AH	AF	R	MO	AH	AF	R	MO	AH	AF	R	MO	AH	AF	R
Sol brun noir :																				
Ey 11-1	268	226,6	300	190	265	200	302	189	255	239	324	190	—	—	—	—	—	—	—	—
Ey 19-1	—	237	327	—																
Ey 18-1 (1)	260	236,6	330	200	266	248	329,4	190	248	173,5	340	210	217,7	206,4	320	190	245,2	234,8	348,1	200
Ey 18-1 (2)	245,4	175,4	310	200	243	192,6	329,0	187	228	186,3	290	200	212	186,3	270	190	244,5	204,5	332	200
Sert (1)	226	235,8	326	200	238	234	258	200,7	208,5	155	253	200	220	219	260	200	210	221,4	253	200
Sert (2)	224	231,6	330	200	222,1	248	238,3	193	204	154,7	253	200	236	208,8	277	200	212	172,3	252	200
Sol sablo-argileux :																				
Brenne	240	190	326	200	195,2	187,2	290	180	190	190	270	180	242	190	325	190	235	210	340	190
Sol brun calcimorphe :																				
Champagne berrichonne	202	175,5	325	201	192	190	250,2	150	208	181	200	178	226	172,8	320	200	205	191,2	200	201,4
Terre de Groie	224	213,7	320	200	208,5	214	212	200	225	206,5	280	154	215	198	295	181,2	220	198,2	320	190

MO : Matière organique.
AH : Acides humiques.
AF : Acides fulviques.
R : Composés organiques dans résidu d'extraction.

(1) Tamisé à 200 microns.
(2) Tamisé à 315 microns.

moins évoluée, la capacité de rétention de glycol est, dans l'ensemble, un peu inférieure à celle rencontrée pour les fractions liées.

Par contre, il existe peu de différences entre les quantités de glycol fixées par la matière organique des fractions libres (dé < 2) et liées (dé > 2).

Dans le cas des fractions libres dé < 1,75, on se trouve en présence d'éléments organiques (débris végétaux), en cours d'humification (HÉNIN et TURC, 1950) mais ne possédant pas encore suffisamment de groupements fonctionnels favorisant la rétention.

La séparation densimétrique par la solution de densité 2, a provoqué vraisemblablement l'entraînement, dans la phase de densité < 2, d'un matériau organique déjà bien évolué, presque identique à celui de la fraction dense.

b) *Les acides humiques* présentent une capacité de rétention de glycol variant de 180 à 230 mg/g, selon leur origine.

c) *Les acides fulviques* adsorbent des quantités plus élevées de glycol que les acides humiques. De poids moléculaire plus faible (2 000 à 3 000 ; PRÉVOT, 1971), ces substances groupent un plus grand nombre de particules, dans un échantillon de 1 gramme, que les acides humiques, dont les poids moléculaires varient de 3 000 à 100 000 et plus. Les phénomènes de surface, sont, de ce fait, plus importants. De plus, les acides fulviques possèdent une forte acidité totale due à la présence de groupements carboxyliques plus nombreux (PRÉVOT, 1971 ; RASHID, 1971).

d) *Les composés humiques des résidus d'extraction* provenant soit de la terre fine, soit des diverses fractions densimétriques, montrent une capacité de rétention de glycol pratiquement stable, voisine de 200 mg/g.

On a déjà signalé que la décroissance de la rétention du glycol est due, pour les fractions libres, au faible degré d'humification de ces composés organiques, comme on l'a constaté auparavant pour la matière organique de la fraction dé < 1,75.

Par contre, dans le cas de l'humine, ce phénomène est imputable au fait que, le matériau organique possédant un poids moléculaire très élevé (300 000 ; PRÉVOT, 1971), le nombre des particules dans un gramme de ce produit est faible.

e) *Le tamisage* à deux dimensions différentes (200 et 315 microns), d'échantillons de substances organiques provenant de sols bruns noirs apporte quelques modifications, d'importance réduite, dans la capacité de rétention du glycol, notamment pour les acides fulviques, et dans certains cas, pour les acides humiques (modification de la taille des agrégats des substances humiques).

Le tableau 2 permet d'établir une comparaison entre les valeurs des quantités de glycol adsorbées par les acides fulviques, humiques et hymatomélaniques extraits de quelques sols. On constate que la rétention par les acides hymatomélaniques donne des valeurs moyennes comprises entre celles des acides humiques et des acides fulviques. Ces acides hymatomélaniques représenteraient donc un stade intermédiaire entre les acides fulviques et les acides humiques, comme paraissent le considérer DUPUIS *et al.* (1970), à la suite de l'étude de leur comportement thermique.

Notre étude semble montrer que les quantités de molécules de glycol retenues à la surface de la matière organique varient avec la nature du matériau organique. Les différences enregistrées dans la capacité de rétention seraient non seulement imputables à la taille des particules et à la structure chimique des éléments orga-

niques mais également à certains facteurs (en rapport parfois avec la structure chimique) tels que l'acidité totale et le taux d'humification.

Il nous a paru intéressant de vérifier cette hypothèse en étudiant l'influence de ces deux facteurs sur les phénomènes de rétention du glycol par la matière organique.

TABLEAU 2

Comparaison entre les rétentions de glycol par les acides humiques, fulviques et hymatomélaniques extraits de sols

(en mg/g)

Sols	Rétention EG acides humiques	Rétention EG acides fulviques	Rétention EG acides hymatomélaniques
Sol brun noir humifère			
Sert:			
fraction dé > 1,75	221,4	253	226
fraction dé < 1,75	220,0	277	232
Tourbière:			
(Lailloux H.V.)	173,0	—	250
Terre de Groie:			
fraction dé > 1,75	198	320	257

C. — *Influence de l'acidité totale et du taux d'humification sur la rétention du glycol par les substances humiques*

a) *Acidité totale.*

WEBER *et al.* (1969), parmi d'autres auteurs, considèrent que l'acidité des substances humiques est due à la présence d'H^+ provenant des groupements —COOH aromatiques et aliphatiques et des groupes —OH phénoliques et alcooliques. SCHNITZER et DESJARDINS (1965), SCHNITZER et GUPTA (1965) démontrent que ces fonctions sont responsables de la capacité d'échange de la matière organique.

L'ensemble des ions H^+ issus de ces divers groupements constitue l'acidité totale.

Dans les échantillons étudiés, et comme l'indique le tableau 3, cette acidité totale est composée en majeure partie, des protons dissociés des OH phénoliques, conditions déjà rencontrées dans un certain nombre de sols par SCHNITZER et DESJARDINS (1965) et RASHID et KING (1969).

La comparaison des valeurs de la CEC de 20 échantillons d'acides humiques extraits de la terre fine et des fractions densimétriques des sols étudiés et de celles de leur acidité totale permet de distinguer une relation (fig. 1) très étroite entre ces deux variables, avec un coefficient de corrélation voisin de 1. Le coefficient de régression est très significatif pour une probabilité de 0,05.

Ces résultats nous conduisent donc à contrôler si ces radicaux (COOH et OH) porteurs de charges négatives, dont sont pourvues les substances humiques et dont

le rôle paraît prépondérant dans la capacité d'échange de cations, interviennent également dans les phénomènes d'adsorption du glycol par la matière organique.

La figure 2 montre l'existence d'une relation entre les quantités de glycol fixées par les constituants humiques et l'acidité totale mesurée sur ces derniers, avec un coefficient de corrélation $r = 0{,}885$ et un coefficient de régression $t = 7{,}60$.

TABLEAU 3

Acidité totale, capacité d'échange de cations et rétention de glycol mesurées sur des acides humiques extraits des sols étudiés

Échantillon	Fraction	Acidité en méq/g			CEC en méq/g	Rétention EG (en mg/g)
		groupes —COOH	groupes —OH	totale		
Sols bruns noirs humifères						
Ey 18-1						
Acides humiques	terre fine	4,0	11,8	15,8	2,25	236,6
	dé < 2	3,4	13,3	16,7	2,45	248,0
	dé > 2	3,3	14,6	17,9	2,55	173,5
	dé < 1,75	1,6	12,6	14,2	2,20	206,4
	dé > 1,75	3,9	15,2	19,1	2,50	234,8
Ey 11-1						
Acides humiques	dé < 2	3,2	14,5	17,7	2,55	200
	dé > 2	3,4	19,6	23,0	n. d.	239
Ey 19-1						
Acides fulviques	terre fine	4,6	13,2	17,8	n. d.	327
Sert	terre fine	4,7	20,4	25,1	2,78	235,8
Acides humiques	dé < 2	3,5	15,3	18,8	2,73	234,0
	dé > 2	4,5	18,5	23,0	2,46	155,0
	dé > 1,75	4,1	19,9	24,0	2,19	221,4
Sol sablo-argileux de Brenne						
Acides humiques	terre fine	4,8	21,2	26,0	n. d.	190
	dé > 2	4,3	14,0	18,3	n. d.	190
Sol brun calcimorphe Champagne berrichonne						
Acides humiques	terre fine	3,3	15,7	19,0	2,20	175,5
Terre de Groie	terre fine	6,3	19,2	25,5	2,38	213,7
Acides humiques	dé > 2	4,0	20,0	24,0	n. d.	206,5
	dé > 1,75	4,8	19,7	24,5	2,0	198,2

Ces résultats confirment donc bien le rôle joué par l'acidité totale, c'est-à-dire par la majeure partie des groupes fonctionnels —COOH et —OH dans les phénomènes de surface de la matière organique, principalement pour la capacité d'échange des cations et pour la rétention de molécules polaires.

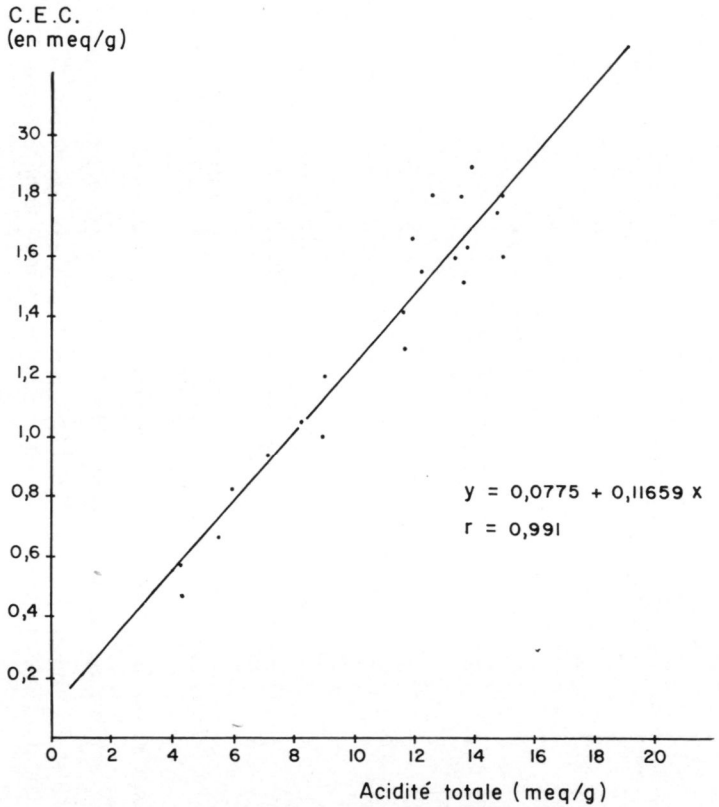


FIG. 1. — *Valeurs de la CEC d'acides humiques en fonction de leur acidité totale*

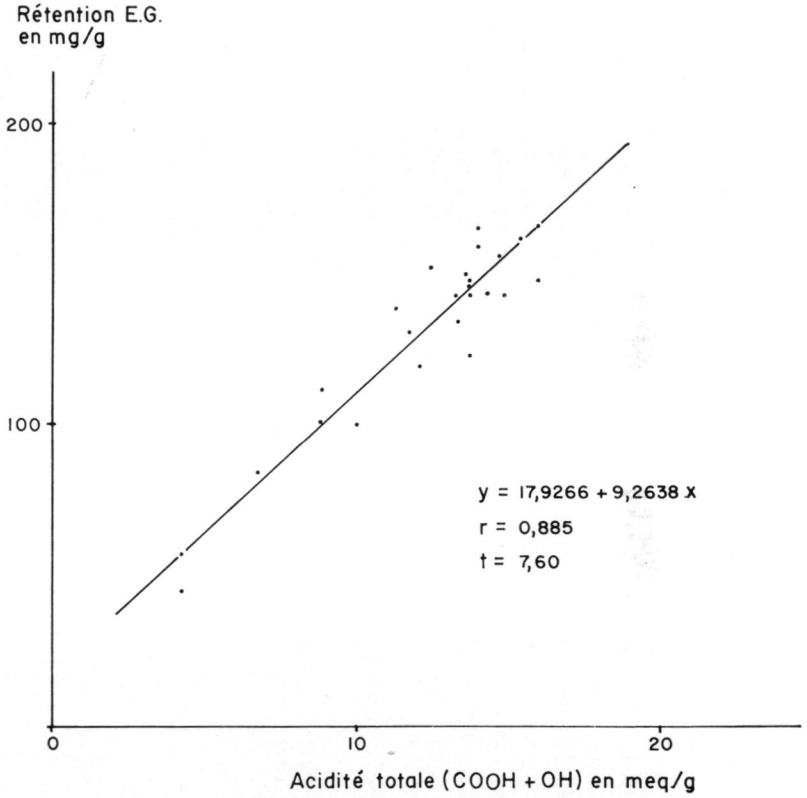


FIG. 2. — *Importance de la rétention de l'éthylène-glycol en fonction de l'acidité totale des acides humiques*

b) *Taux d'humification.*

L'examen du tableau I avait permis de constater que les quantités de glycol retenues par la matière organique fraîche, du moins peu évoluée, étaient plus faibles. Il apparaissait donc que le degré d'humification de la matière organique pouvait être considéré comme un facteur ayant une incidence sur la rétention du glycol, vraisemblablement par le biais de la présence des fonctions COOH et OH. SCHNITZER et DESJARDINS (1965) indiquent qu'un accroissement des teneurs en groupements carboxyles se produit avec l'élévation du degré d'humification. N'GUYEN KHA *et al.* (1969) étudiant la décomposition des tissus végétaux constatent que la capacité d'échange s'accroît corrélativement avec la progression de cette décomposition, c'est-à-dire avec l'humification. Cette influence du taux d'humification de la matière organique sur la rétention du glycol est bien mise en évidence dans la figure 3.

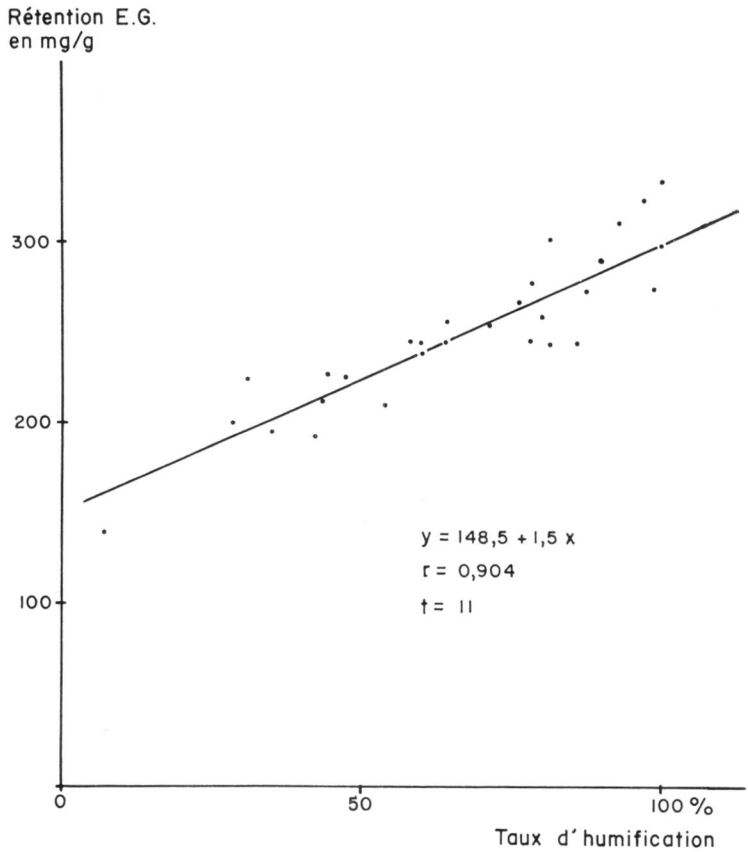


FIG. 3. — *Influence du taux d'humification sur la rétention d'éthylène-glycol par les composés humiques*

c) *Observations sur la rétention du glycol par les substances humiques.*

Il est évident que la confrontation des résultats et des relations parfois très étroites entre les quantités de glycol fixées par la matière organique et quelques facteurs comme l'acidité totale et le degré d'humification, ne permet pas de déter-

miner le mode d'arrangement des molécules de glycol à la surface des particules du matériau organique.

Dans le but d'apporter des éléments supplémentaires à la vérification des résultats obtenus dans le cadre de ces essais, on a construit un graphique (fig. 4) sur lequel ont été portées, en abscisse, les quantités de glycol retenues par 37 échantillons de matière organique présente dans les sols et les fractions densimétriques étudiées.

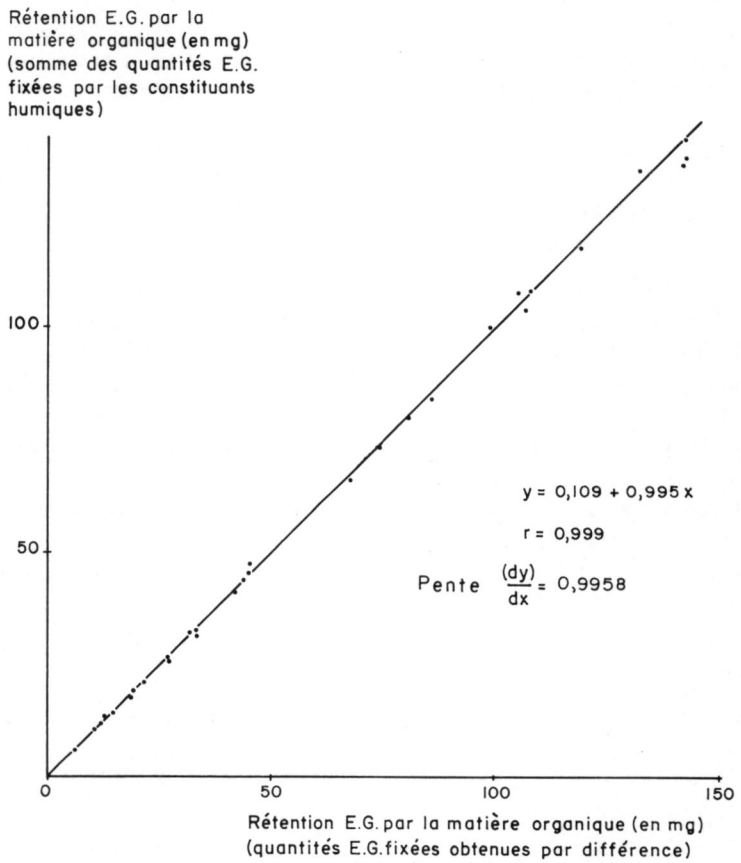


FIG. 4. — *Comparaison entre les valeurs des quantités de glycol adsorbées par la matière organique obtenues par deux modes de calcul différents*

Par contre, les valeurs, en ordonnée, représentent la somme des quantités de glycol fixées par chacun des constituants de la matière organique pour chaque échantillon. Ces quantités ont été préalablement déterminées sur 1 g de chaque composé humique extrait, puis ramenées au taux de ce composé dans l'échantillon de sol étudié.

De l'étude du graphique 4, on peut tirer les conclusions suivantes :

— les quantités de glycol fixées par la matière organique sont sensiblement égales à la somme de celles retenues par chacun des constituants humiques ;

— l'association glycol-matière organique ne provoque pas de phénomène de surstructuration ;

— les teneurs en groupements fonctionnels COOH et OH ne semblent pas modifiées par les solutions d'extraction, même si des processus de néoformation interviennent ;

— le fait que la droite de régression passe par l'origine permet de supposer que le taux de matière minérale accompagnant les substances humiques extraites est très faible.

On sait que parmi les facteurs agissant sur l'adsorption des molécules polaires, et notamment ceux qui perturbent leur disposition à la surface des argiles, les cations échangeables jouent un rôle prépondérant. Nous allons voir si la nature du cation influence également l'adsorption de glycol par la matière organique.

IV. — PHÉNOMÈNES D'ADSORPTION SUR LES HUMATES MÉTALLIQUES

Des acides humiques extraits d'échantillons prélevés dans une tourbière de la région de Lailloux (Haute-Vienne) ont été saturés avec des solutions 0,1 N de chlorures métalliques, afin d'en obtenir les humates correspondants.

On sait que les substances organiques ont la possibilité, par leurs charges négatives, de fixer les cations. Ces derniers présentent également une énergie de rétention variable selon leur nature et celle de l'adsorbat (énergie d'hydration pour les molécules d'eau — solvatation pour les molécules de glycol).

C'est pourquoi la rétention ou l'adsorption de ces deux types de molécules a été étudiée, et les résultats enregistrés ont été consignés dans le tableau 4.

L'intensité de la rétention des molécules polaires par les argiles homoioniques est dans l'ordre : $K^+ < Na^+ < Al^{+++} < Mg^{++} < Ca^{++}$.

TABLEAU 4

Quantités de glycol et de vapeur d'eau adsorbées par des acides humiques et humates métalliques

	Rétention glycol à 25°C (en mg/g)	Adsorption H_2O à 20°C	
		Couche monomoléculaire B. E. T. (en mg/g)	E_1 (cal · mole^{-1})
Acide humique .	179	43,7	12 115
Humate Li^+	243	—	—
Humate Na^+....	235	54,9	11 836
Humate K^+	234,4	—	—
Humate Ca^{++} ..	242,3	61,4	11 941
Humate Mg^{++} ..	237,0	57,5	12 157
Humate Cu^{++} ..	211,0	44,1	12 107
Humate Zn^{++} ..	156,0	—	
Humate Fe^{+++} .	265,6	54,4	12 252
Humate Al^{+++} ..	257,0	68,7	11 775

Il semble, en examinant le tableau 4, que pour les humates, l'ordre des énergies d'adsorption soit quelque peu différent.

On constate, en effet, que ce sont surtout les humates Fe^{+++} et Al^{+++} qui retiennent la plus forte quantité de glycol. Il en est de même pour l'adsorption monomoléculaire de la vapeur d'eau à 20°C, selon les calculs B. E. T. (E_1 = énergie d'adsorption de la première couche étant proche de l'énergie de liquéfaction de la vapeur d'eau (10 550 cal · mole — 1), on peut en effet appliquer l'équation B. E. T.).

Les isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau à 20°C (fig. 5 et 6) montrent, que pour une humidité relative de 50 p. 100, les humates Al^{+++}, Ca^{++} et Mg^{++} retiennent 10 p. 100 d'eau, alors que l'adsorption des autres humates est plus faible.

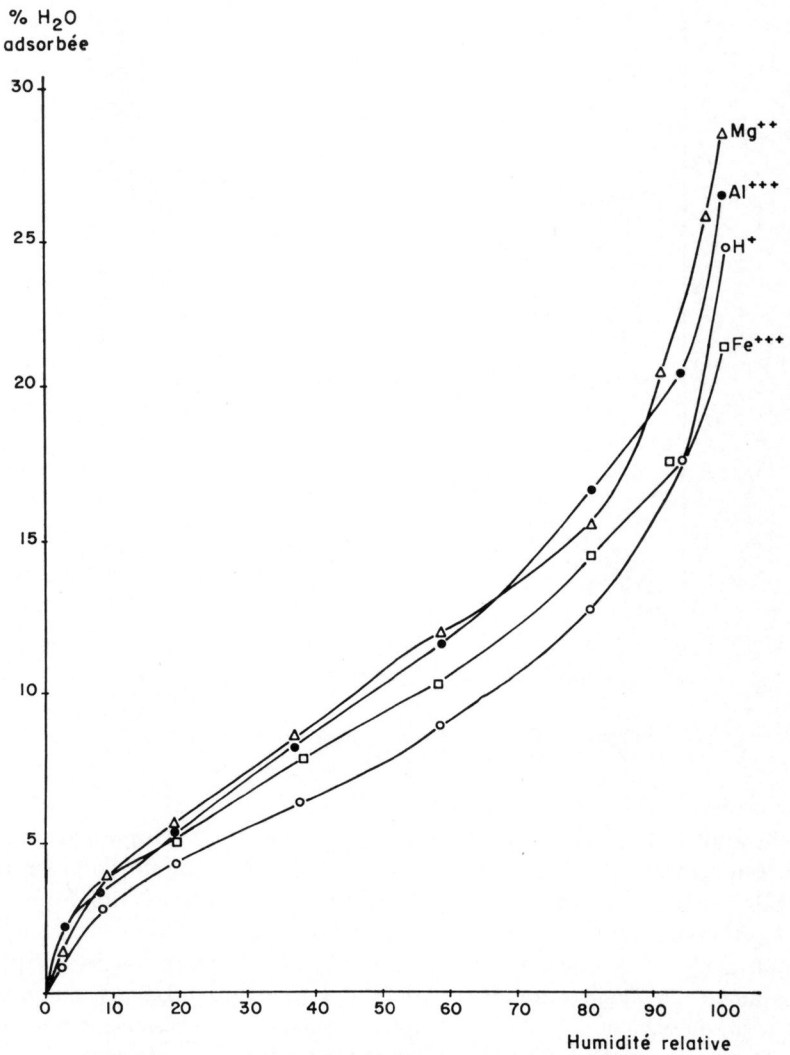


FIG. 5. — *Isothermes d'adsorption de vapeur d'eau à 20°C sur humates H^+, Mg^{++}, Al^{+++} et Fe^{+++}*

L'influence de la nature des cations, et notamment les cations di et trivalents, sur la rétention des molécules polaires, déjà signalée pour les mesures de surface des argiles par adsorption (GUYOT, 1969), est indéniable dans les cas des humates. On montre bien qu'il s'agit d'une liaison par solvatation du cation fixé à la matière organique.

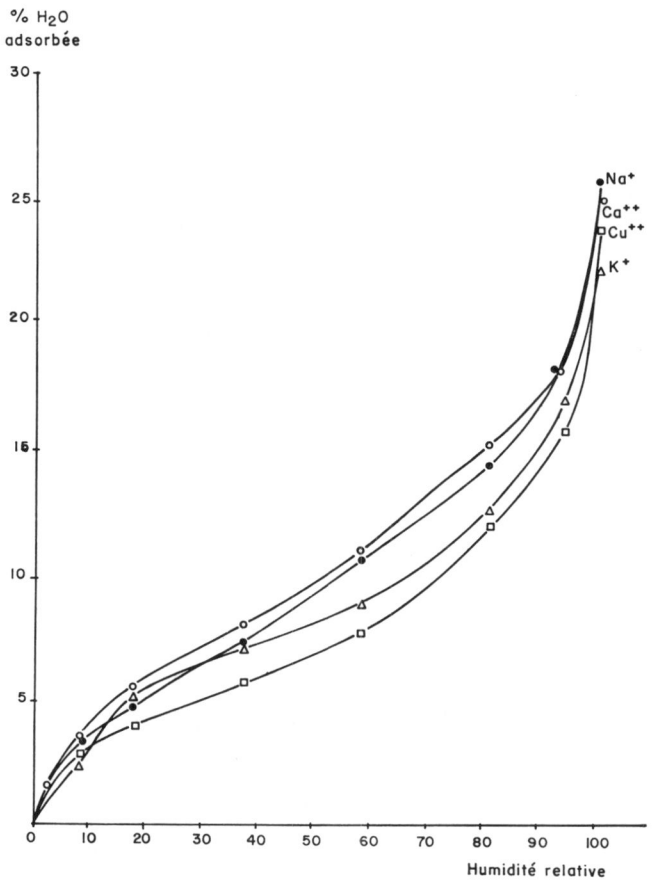


FIG. 6. — *Isothermes d'adsorption de vapeur d'eau à 20°C sur humates Na^+, K^+, Ca^{++} et Cu^{++}*

Par rapport à la rétention de glycol par les acides humiques, la présence de cations échangeables (humates) provoque un accroissement de l'adsorption de ce solvant de l'ordre de 30 à 40 p. 100 pour les cations di- ou trivalents. Pour la vapeur d'eau, la différence de rétention varie de 25 à 60 p. 100.

Si on applique l'équation B. E. T. aux isothermes d'adsorption de la vapeur d'eau sur les humates et acides humiques, pour des pressions relatives comprises entre 0,05 et 0,30, on obtient la valeur Vm, correspondant à une couche monomoléculaire de vapeur d'eau sur l'adsorbant, à partir de laquelle la surface spécifique de cet adsorbant peut être évaluée.

V. — MESURE DE LA SURFACE B. E. T. DES COMPOSÉS HUMIQUES A PARTIR DE L'ADSORPTION DE BUTANE

La forme en S des courbes des isothermes d'adsorption de butane (fig. 7) sur les acides humiques et les humates permet, en effet, d'utiliser l'équation B. E. T. pour la détermination de V_m, et à partir de cette valeur, de la surface de ces substances organiques.

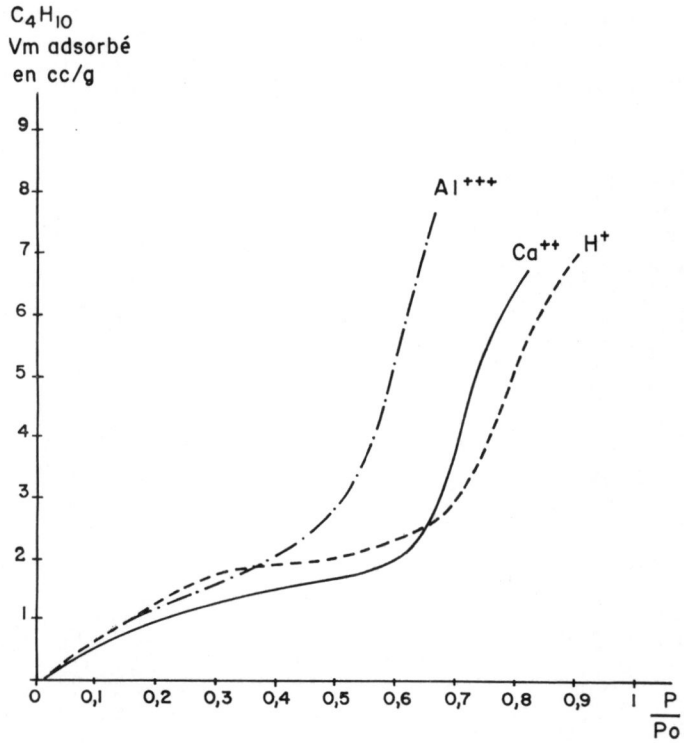


FIG. 7. — *Isothermes d'adsorption du butane à 0°C sur acide humique et humates Al^{+++} et Ca^{++}*

Toutes ces valeurs ont été consignées dans le tableau 5.

On constate que les surfaces (en m^2/g) développées par les acides humiques et les humates sont très faibles, mais leurs valeurs ne sont guère inférieures à celles enregistrées par KRUSTANOV et PETKOV (1968) à partir des isothermes d'adsorption de N_2 à — 196°C sur des acides humiques extraits de divers types de sols.

Ces auteurs calculent le diamètre des particules du matériau organique à partir de l'équation :

$$2r = \frac{6V}{S}$$

où $2r$ = diamètre des particules,
V = volume des particules, calculé à partir de la densité réelle,
S = surface spécifique mesurée par adsorption de molécules neutres.

Cette formule, appliquée à nos résultats, a permis une estimation, sans doute très grossière, de la taille des particules des acides humiques et humates étudiés. Le diamètre moyen varie de 2 000 à 3 500 Å (tabl. 5).

TABLEAU 5

Valeurs de Vm (en cm^3/g, à 0°, sous 760 mm Hg) *et des aires des surfaces d'acides humiques et d'humates métalliques. Appréciation de la taille des particules*

Désignation	Vm C_4H_{10} (cm^3/g)	Surface S (m^2/g)	Densité réelle	Diamètre particules en Ångströms
Acides humiques				
Brenne terre fine	2,19	26	—	—
Fraction dé > 1,75	0,53	6,3	—	—
Sols noirs				
Ey 18-1				
Fraction dé > 1,75	1,00	11,8	1,64	3 096
Fraction dé > 2	0,95	11,2	—	
Ey 11-1 terre fine	2,71	34,6-29	—	
Sert				
Fraction dé > 2	1,14	13,5	1,63	2 724
Fraction dé > 1,75	1,00	11,8	1,63	3 116
Sols bruns calcimorphes				
Terre fine	1,52	18	—	
Fraction dé > 1,75	1,46	17,25	—	
Terre de Groie				
Terre fine	4,0	47,4	—	
Tourbière-Lailloux				
Humate H^+	1,96	17	1,64	2 149
— Fe^{+++}	1,35	16	1,71	2 190
— Li^+	1,00	11,8	1,60	3 178
— Cu^{++}	1,080	12,7	—	
— K^+	1,08	12,7	1,59	2 966
— Ca^{++}	1,12	13,2	1,75	2 595
— Al^{+++}	1,22	14,4	1,64	2 537

Le tableau 6 permet de comparer les surfaces d'humates métalliques mesurées à partir des isothermes d'adsorption de butane et de vapeur d'eau.

Les écarts enregistrés sont élevés, par suite du comportement différent de chaque adsorbat.

Il semble que la molécule d'eau, douée d'une forte polarité, puisse pénétrer entre les chaînes latérales des acides humiques (KRUTANOV et PETKOV, 1968), contrairement à la molécule neutre de butane, par ailleurs de dimensions plus élevées, qui ne serait retenue à la surface des matériaux que par des forces très faibles (forces de Van Der Waals).

TABLEAU 6

Surfaces B. E. T. mesurées à partir des isothermes d'adsorption de butane à 0° et de vapeur d'eau à 20°C

	S (m^2/g) Butane	S (m^2/g) H_2O
Humate H	17	122,5
Humate Na	—	153,8
Humate K	12,7	—
Humate Ca	13,2	171,9
Humate Mg	—	161,0
Humate Fe	16	152,0
Humate Al	14,4	192,3

Les encombrements spécifiques α_m du Butane et de l'eau sont ceux utilisés pour la mesure des surfaces des argiles.

VI. — ESSAI D'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR LA RÉTENTION DU GLYCOL PAR LES SUBSTANCES ORGANIQUES DES SOLS

On a estimé le volume des vides dans chaque échantillon afin de s'assurer que la rétention d'éthylène-glycol ou d'eau n'était pas due à un phénomène capillaire.

Ces volumes, ainsi que ceux de l'éthylène-glycol et de l'eau retenus par les substances humiques ont été portés dans le tableau 7.

De l'examen de ce tableau, il s'est dégagé les constatations suivantes :

— les volumes de solvants organiques adsorbés sont nettement inférieurs à ceux des vides de l'échantillon correspondant ;

— la porosité est très variable d'un échantillon à l'autre, alors que les volumes des adsorbats restent remarquablement constants.

La rétention des molécules de glycol par la matière organique semble donc bien un phénomène indépendant du volume des vides existant dans chaque échantillon, et que l'on pourrait interpréter comme un effet lié à la surface accessible du matériau organique.

Il est évident que le mécanisme d'adsorption du glycol à la surface des substances organiques des sols reste encore très complexe, mais il est à peu près certain, dans le cadre de notre expérimentation, que ces molécules polaires sont retenues autrement que par « effet d'éponge ».

On a montré en effet que la quantité de glycol retenue par le matériau organique était fonction :

— du contenu des groupements fonctionnels COOH et OH,

— de la nature du cation échangeable.

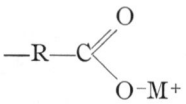
TABLEAU 7

Comparaison entre les volumes des vides et les volumes des diverses substances organiques fixées par des acides humiques et des humates

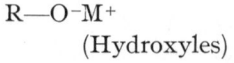
Désignation	Densité apparente γ_a	Densité réelle (1) γ	Porosité	Volume des vides $\left(\frac{1}{\gamma_a} - \frac{1}{\gamma}\right)$ (en cm³/g)	Volume d'éthylène-glycol fixé (cm³/g)	Volume H_2O adsorbée (20°C) (cm³/g)
Acides humiques						
Sert fraction dé < 2	0,915	1,71	46,5	0,509	0,156	—
Sert fraction dé > 1,75	0,943	1,66	43,2	0,458	0,152	—
Ey 18-1 : fraction dé > 1,75 .	1,010	1,63	38,0	0,377	0,151	—
Humate H^+	0,775	1,64	52,7	0,681	0,145	0,248
Humate Li^+	0,695	1,60	56,5	0,813	0,167	—
Humate Na^+	0,626	1,76	64,4	1,027	0,164	0,260
Humate K^+	0,535	1,59	66,3	1,241	0,162	0,224
Humate Ca^{++}	0,561	1,75	67,9	1,211	0,171	0,246
Humate Fe^{+++}	0,616	1,71	64,0	1,039	0,170	0,223
Humate Al^{+++}	0,636	1,64	61,2	0,963	0,189	0,265

(1) Ces déterminations ont été effectuées par le Laboratoire des Sols de Versailles.

Pour tenter de définir les types de liaison susceptibles de participer aux interactions matière organique-éthylène-glycol, rappelons tout d'abord les formules chimiques des groupements fonctionnels carboxyles et hydroxyles :



(carboxyles)

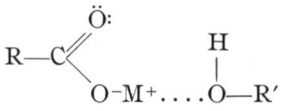


(Hydroxyles)

en envisageant le cas le plus simple où M^+ est un cation monovalent (H, K, Na, Li).

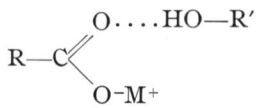
Deux principaux types de liaison peuvent exister dans le cas des groupements carboxyliques :

1. *Solvatation du cation :*



où R′=H (eau)
R′=CH_2—CH_2—OH (glycol)

2. *Liaison hydrogène :*



Dans ce dernier cas, l'un des atomes d'oxygène se comporte comme accepteur de proton.

Pour les groupes fonctionnels hydroxyles (R—O^-M^+) (phénoliques et alcooliques), la solvatation du cation M^+ par le glycol paraît être le phénomène d'interaction déterminant.

Mac Neal (1964), Dowdy et Mortland (1968) ont montré l'importance de l'interaction dipôle—ions polyvalents au détriment de la liaison hydrogène.

Il est possible que d'autres modes de liaison entre l'éthylène-glycol et la matière organique puissent intervenir : liaisons intermoléculaires, forces de dispersion.

VII. — POSSIBILITÉS D'ESTIMATION DE LA SURFACE SPÉCIFIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DE SES CONSTITUANTS

Quel que soit le mécanisme d'adsorption, la disposition des molécules de glycol à la surface du matériau organique n'est pas connue avec précision comme pour les minéraux argileux. Toutefois, l'existence d'interactions, bien définies semble-t-il, entre la matière organique et l'éthylène-glycol a pu être démontrée dans cette étude, aussi est-il permis de supposer, comme le font d'ailleurs Mortland et Kemper (1965), que la relation existant entre l'aire de la surface et l'adsorption de glycol est la même avec la matière organique qu'avec la fraction minérale des sols.

Sur cette base, une appréciation, même très approximative, de la surface spécifique totale des constituants organiques peut être tentée.

Cette surface varierait entre 600 et 850 m^2/g pour la matière organique des sols (selon le type de sol).

Pour les acides humiques et hymatomélaniques, les aires des surfaces seraient comprises entre 550 et 800 m^2/g (pour des particules de diamètre 2 000-3 000 Å), mais elles atteindraient 1 200 m^2/g pour les acides fulviques.

L'humine, constituée de molécules fortement polymérisées à poids moléculaires élevés, présenterait une surface voisine de 600 m^2/g.

VIII. — CONCLUSION

La rétention de l'éthylène-glycol par les constituants de la matière organique peut être considérée comme un effet lié aux phénomènes de surface de cette dernière.

Elle est fonction d'une part, du taux de groupements fonctionnels COOH et OH dans le matériau organique, d'autre part, de la nature des cations échangeables. Les modes de liaison se rattachent à deux types principaux : liaison hydrogène et solvatation des cations.

L'importance des quantités de glycol fixées par la matière organique, sensiblement du même ordre de grandeur que celles retenues par les minéraux argileux à réseaux expansibles, souligne bien l'intensité des phénomènes de surface du matériau organique.

Le plus spectaculaire est, sans conteste, l'interaction entre les composés organiques et la fraction argileuse des sols (MONNIER, 1965 ; GREENLAND, 1965), avec tous les effets qui en découlent pour les propriétés physiques (formation d'agrégats, perméabilité) et physico-chimiques (adsorption de cations) des sols.

La formation des complexes humus-Ca (rendzines, sols bruns calcimorphes) et humus-Al (sols bruns acides, podzols) est également une des conséquences notables de ces phénomènes de surface de la matière organique.

Malgré l'imprécision concernant l'arrangement des molécules polaires à la surface des particules du matériau organique, il semblerait que l'on puisse utiliser la technique de rétention de glycol pour apprécier, d'une façon sans doute très approximative, la surface spécifique de la matière organique et de ses constituants.

Reçu pour publication en mars 1973.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE SURFACE PHENOMENA OF THE ORGANIC MATTER OF SOILS : HUMIC SUBSTANCES — ETHYLENE-GLYCOL INTERACTIONS

The importance of ethylene-glycol retention by organic matter, and each of its main constituants, was studied for different types of soils. Relations between the extent of this retention and the values of some elements (total acidity — rates of humification) were recorded.

The effect of the nature of exchangeable cations (metallic humates) in the phenomena of retention (glycol) and adsorption (H_2O, C_4H_{10}) was also emphasized.

The experimental results were interpreted in an attempt to define the types of link taking part in the organic matter-glycol interaction. Although numerous doubts exist with respect to the arrangement of the polar molecules on the surface of particles of organic matter, it appears, however, that the use of the glycol retention method for measuring the surface of the organic material of soils, in a very rough way, is possible.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR UNTERSUCHUNG DER OBERFLÄCHENEFFEKTE DER ORGANISCHEN BODENSUBSTANZ : WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN DEN HUMUSSUBSTANZEN UND ÄTHYLENGLYKOL

Es wurde für verschiedene Bodentypen die Bedeutung der Äthylenglykolretention durch die organische Materie und jeden seiner Hauptbestandteile untersucht. Die Beziehungen zwischen der Grösse dieser Retention und den Werten für verschiedene Eigenschaften (totale Azidität — Humifikationsgrad) wurden aufgezeichnet.

Der Einfluss der Art der austauschbaren Kationen (Metallhumate) in den Retentions (Glykol) und Adsorptionseffekten H_2O, C_4H_{10}) wurde ebenfalls unterstrichen.

Es wurde eine Interpretation der Versuchsergebnisse unternommen, um die an der Wechselwirkung der organischen Substanz mit Glykol teilnehmenden Bindungstypen zu definieren zu versuchen. Obwohl zahlreiche Ungewissheiten bezüglich der Lage der polaren Moleküle an der Teilchenoberfläche der organischen Materie bestchen, scheint es dennoch möglich, die Methode der Glykolretention zur — wenn auch sehr näherungsweisen — Messung der Oberfläche der organischen Bodenmaterie zu verwenden.

РЕЗЮМЕ

К изучению поверхностных явлений у органического вещества почв : взаимодействие гуминовых веществ с этилен-гликолем.

Ж. ГЮИЙО, Ж. ДЕЖУ, Ф. ЛАМИ.

Сила задержания этилен-гликоля органическим веществом и каждой из его главных составных изучалась в различных типах почв. и регистрировались соотношения между размерами этого задержания и показателями некоторых признаков этих почв (общая кислотность — процент гумификации).

Подчеркивается влияние природы обменных катионов (гуматы металлов) на феномен задержания (гликоля) и адсорбции (H_2O,C_4H_{10}).

Проводится интерпретация экспериментальных результатов чтобы попытаться определить типы связей участвующих во взаимодействии органического вещества с гликолем. Несмотря на существование некоторой неуверенности по поводу расположения полюсных молекул на поверхности частичек органического вещества, кажется однако возможным применять метод задержания гликоля для весьма приблизительного измерения поверхности органического материала почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOWER C. A., GSCHWEND F. B., 1952. Ethylene-glycol retention by soils as a measure of surface area and interlayer swelling. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **16**, 342-345.

BOWER C. A., GOERTZEN J. O., 1959. Surface area of soils and clays by an equilibrium ethylene-glycol method. *Soil Sci.*, **87** (5), 289-292.

BURFORD J. R., DESHPANDE T. L., GREENLAND D. J., QUIRK J. P., 1964. Influence of organic materials on the determination of the specific surface areas of soils. *J. Soil Sci.* **15** (2), 192-201.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., 1968. Juxtaposition de sols noirs, très riches en matière organique, et de sols bruns acides sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat le Château (Haute-Vienne). *Ann. agron.* **19** (5), 511-539.

DEJOU J., GUYOT J., MORIZET J., JAMAGNE M., MARIN M., 1969. Les sols noirs, très riches en matières organiques, reposant sur leucogranites dans la région d'Eymoutiers-Peyrat le Château (Haute-Vienne). *Ann. agron.* **20** (5), 517-526.

DOWDY R. Y., MORTLAND M. M., 1968. Alcohol-water interactions on montmorillonite surfaces. II. Ethylène-glycol. *Soil Sci.*, **105** (1), 36-43.

DUCHAUFOUR Ph., JACQUIN F., 1966. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des composés humiques. *Bull. E. N. S. A.*, Nancy, **8**, 1, 1-24.

DUPUIS Th., JAMBU P., 1969. Étude par spectrographie infrarouge des produits de l'humification en milieu hydromorphe calcique. *Sci. Sol*, **1**, 23-35.

DUPUIS Th., JAMBU P., DUPUIS J., 1970. Étude par analyse thermique différentielle des substances organiques extraites de sols hydromorphes calciques. *Ann. agron.* **21** (1), 75-94.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.* **69** (6), 421-432.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part I. Mechanisms of interaction between clays and defined organic compounds. *Soils and Fertil.* **28** (5), 415-425.

GREENLAND D. J., 1965. Interaction between clays and organic compounds in soils. Part II. Adsorption of soil organic compounds and its effect on soil properties. *Soils and Fertil.*, **28** (6), 521-532.

GREENLAND D. J., 1971. Interactions between humic and fulvic acids and clays. *Soil Sci.* **111** (1), 34-41.

GUYOT J., 1969. Mesure des surfaces spécifiques des argiles par adsorption. *Ann. agron.* **20** (4), 333-359.

GUYOT J., DEJOU J., LAMY Ph., 1971. Essai de détermination du taux de matière organique des sols à partir de l'analyse thermogravimétrique. Comparaison avec la méthode basée sur le dosage du carbone par voie chimique. *C. R. Acad. Sc.* Paris, **272**, 1854-1856.

HÉNIN S., TURC L., 1950. Essais de fractionnement des matières organiques du sol. *Trans. 4th intern. Congr. Soil Sci.*, Amsterdam, 152-154.

KONONOVA M. M., 1961. *Soil organic matter.* Pergamon Press., 450 p.

KRUSTANOV S., PETKOV I., 1968. Application of the B. E. T. method in the study of soil organic matter. *C. R. Ac. Sci. Agric.* Bulgarie, **1** (3), 231-238.

METSON A. J., 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. *New Zealand Soil bureau.* Bull. nº 12.

MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUSINAN C., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.* **13** (1), 55-63.

MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.* **16**, 327-400 et 471-534.

MORTLAND M. M., KEMPER W. D., 1965. Specific surface in *Methods of soil analysis* (American Society of Agronomy, Madison) **42**, 532-543.

NGUYEN KHA, VEDY J. C., DUCHAUFOUR Ph., 1969. Étude expérimentale de l'évolution saisonnière des composés humiques en climat tempéré. *Pédologie* **19** (1), 5-22.

PAULING L., 1960. *The nature of the chemical bond.* 644 p. Cornell University press. Ithaca.

PRÉVOT A. R., 1971. *Humus*, 342 p. Éditions de la Tourelle. Saint-Mandé.

RASHID M. A., 1969. Contribution of humic substances to the cation exchange capacity of different marine sediments. *Marit. Sedim.* **5** (2), 44-50.

RASHID M. A., KING L. H., 1970. Major oxygen-containing functional groups present in humic and fulvic acid fractions isolated form contrasting marine environments. *Geochimica et cosmochimica acta* **34**, 193-201.

SCHNITZER M., DESJARDINS J. G., 1965. Carboxyl and phenolic hydroxyl groups in some organic soils and their relation to the degree of humification. *Canad. J. Soil Sci.* **45**, 257-264.

SCHNITZER M., GUPTA U. C., 1965. Determination of acidity in soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **29**, 274-277.

VISSER S. A., 1963. Electron microscope and electron-diffraction patterns of humic acids. *Soil Sci.* **96**, 353-356.

WEBER J. B., WEED S. B., WARD T. M., 1969. Adsorption of *s*-triazines by soil organic matter. *Weed science* **17** (4), 417-421.

Ann. agron., 1973, **24** (5), 571-584.

QUELQUES ASPECTS DE LA COMPÉTITION ENTRE PLANTES SPONTANÉES ET PLANTES SEMÉES DANS LES PRAIRIES TEMPORAIRES DE DACTYLE ET DE FÉTUQUE ÉLEVÉE DANS LES MONTS DORE

Influence du rythme de pâture et de la fertilisation azotée

F. de MONTARD* et R. ARNAUD**

Stations d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes**,*
Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
63100 Clermont Ferrand

RÉSUMÉ

Le comportement des prairies de Dactyle Prairial et de Fétuque élevée S 170, conduites en pâturage rationné avec des moutons, a été étudié de 1967 à 1970 sur les sols volcaniques des Monts d'Auvergne à Laqueuille (1 050 m d'altitude).

La production augmente avec le niveau de fertilisation azotée ; elle diminue lorsque le rythme d'exploitation est accéléré.

De 1967 à 1969, la production moyenne de l'essai diminue, bien que les doses d'azote appliquées s'accroissent. Le Dactyle manifeste davantage cette diminution que la Fétuque.

Les peuplements sont partiellement détruits par le froid au cours de l'hiver 1969-70 ; la Fétuque est beaucoup plus sensible que le Dactyle ; mais les dégâts dus au froid sont très variables selon le rythme d'exploitation et le niveau de fertilisation azotée ; un rythme rapide d'exploitation et un niveau élevé des apports azotés diminuent la résistance au froid des deux graminées ; l'hypothèse d'une baisse des taux des glucides solubles totaux est avancée dans ces deux cas pour expliquer la sensibilité au froid.

Le salissement de la prairie de Fétuque par les espèces spontanées est ensuite discuté ; *Agrostis tenuis* et *Poa annua* sont les deux plus envahissantes.

Un mode de conduite en pâturage rationné est proposé pour les prairies temporaires d'altitude.

INTRODUCTION

Une étude de comportement en régime de pâture du Dactyle Prairial et de la Fétuque élevée S 170 a été conduite de 1967 à 1970 au domaine I. N. R. A. des Fumades à Laqueuille (Puy-de-Dôme) sur des prairies temporaires semées en 1966.

Les buts de cette expérimentation étaient les suivants :

1° la mise en évidence du potentiel de production de la fétuque élevée et du dactyle exploités en pâturage rationné (1) par des moutons, sous plusieurs régimes d'exploitation et de fertilisation azotée ;

2° l'étude de la pérennité de la variété semée et de l'envahissement par des plantes spontanées après trois années de traitement.

Ce mémoire se rapporte à la compétition entre espèces et aux relations entre les rendements et l'état de la végétation. L'analyse détaillée des résultats de production a été faite ailleurs (ARNAUD, 1972).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Conditions climatiques et édaphiques

Le domaine est situé au nord-ouest des Monts Dore à 1 050 m d'altitude et en climat « montagnard océanique » d'après ESTIENNE (1956). Durant la période 1967-1969, les parcelles ont reçu en moyenne 1 470 mm par an de précipitations, assez régulièrement réparties ; la température moyenne annuelle a été de 6,9°C (moyenne du mois le plus chaud : + 15,5°C et du mois le plus froid : — 1,3°C).

La période de végétation active s'étend du 15 avril au 30 octobre environ, soit 6 mois et demi de température moyenne supérieure à 5°C.

Le sous-sol est constitué par des roches basaltiques. Il est surmonté d'un sol andique humifère désaturé, profond de 80 cm, riche en matière organique (20 p. 100) — dont la minéralisation est assez active (C/N = 11) malgré le pH nettement acide (pH 5,3) — et bien pourvu en phosphore et en potasse assimilables.

Conditions expérimentales

Le dispositif est bâti en double split-plot de manière à faciliter la réalisation de la pâture par les moutons.

Les traitements principaux concernent le rythme d'exploitation :

— rythme A : pâture toutes les 3 ou 4 semaines ;
— rythme B : pâture toutes les 6 ou 8 semaines.

Les traitements subsidiaires concernent le stade de 1re exploitation et la fumure azotée.

Les stades de 1re exploitation ont été :

— stade « épi à 10 cm » et épiaison en 1967 ;
— déprimage (2) et stade « épi à 10 cm » en 1968 et 1969.

Les fumures azotées annuelles appliquées à 2 niveaux ont été :

— N_1 = 80 et N_2 = 160 kg N/ha en 1967,
— N_1 = 150 et N_2 = 300 kg N/ha en 1968,
— N_1 = 250 et N_2 = 500 kg N/ha en 1969,

régulièrement réparties entre les cycles de pousse. Les doses ont été augmentées d'année en année pour étudier une large gamme d'apports azotées sans accroître l'importance du dispositif.

Il y a donc 8 combinaisons de facteurs et le dispositif comprend 6 répétitions ; la dimension des parcelles élémentaires est de 32 mètres carrés.

Une fertilisation annuelle phospho-potassique (120-120) permet d'écarter le risque d'insuffisance de la nutrition en phosphore ; par contre, pour les forts niveaux de la fertilisation azotée, l'éventualité d'un déséquilibre entre la nutrition azotée et la nutrition potassique doit être envisagée.

(1) Les temps de séjour étaient généralement de 24 ou 48 heures avec une forte charge, rarement de 72 heures.

(2) Pâture précoce tout au début de la montée des épis. Après un déprimage, les apex sont intacts et la mise à fleurs a lieu normalement.

Arrière-effet des traitements

Au printemps 1970, des dégâts importants dus aux effets du froid ont été observés dans certaines parcelles, principalement dans la prairie de fétuque élevée S 170 ayant reçu 500 kg/ha d'azote en 1969 (fig. 1).

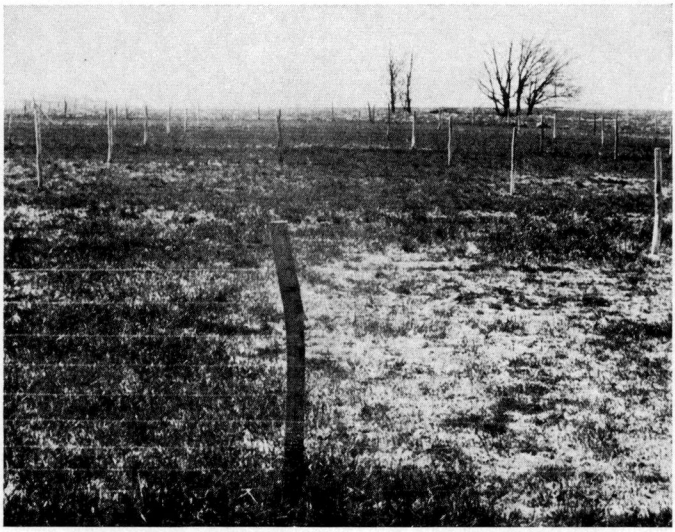


FIG. 1. — *Dégâts de froid sur les parcelles de fétuque élevée conduites en pâtures fréquentes*
à gauche : 250 kg N/ha en 1969
à droite : 500 kg N/ha en 1969
(Photo NIQUEUX, mai 1970)

Pour mesurer l'arrière-effet des traitements, la fétuque et le dactyle ont été exploités d'une manière uniforme sur tout l'essai durant l'année 1970, c'est-à-dire par pâtures répétées toutes les 4 ou 5 semaines, sans déprimage initial. Sur le dactyle, on a continué à appliquer les doses 250 et 500 N ; sur la fétuque, toutes les parcelles ont reçu 250 kg d'azote par ha.

Données recueillies

Avant chaque pâture, un prélèvement a été effectué sur 3 m² (sur chacune des 6 répétitions) pour mesurer les quantités de matière sèche mises à la disposition des moutons. Les contrôles ont été faits dans tous les traitements jusqu'à la fin de l'été 1969. Ils ont cessé en 1970 sur les parcelles de fétuque ayant reçu les fortes doses d'azote et ont été continués sur les autres et sur les parcelles de dactyle pour mesurer l'arrière-effet des traitements sur la production.

Un examen global de la végétation a été fait en août 1970 pour mesurer l'abondance relative de la fétuque élevée et du dactyle en fonction des traitements appliqués les années précédentes. L'examen a consisté en une appréciation visuelle de l'abondance de l'espèce semée, exprimée en pourcentage de couverture de la surface de chaque parcelle élémentaire. Cet examen a permis de comparer les comportements de la fétuque élevée et du dactyle (voir tabl. 1, col. C).

Une analyse de la végétation des parcelles de fétuque élevée a été réalisée en juillet 1970. Elle a été restreinte à 4 répétitions par exclusion des deux blocs extrêmes du dispositif. La méthode d'analyse inspirée de la méthode de la poignée de De Vries a été proposée par KERGUELEN ; l'observateur prélève 10 poignées régulièrement espacées sur l'axe de chaque parcelle, soit 40 poignées par traitement. L'échantillonnage dans 4 répétitions permet de tamponner les effets blocs. Les poignées sont saisies à la main, toujours de la même façon, et coupées au couteau au ras du sol. Les échantillons sont glissés individuellement dans de petits sacs en plastique et leur examen a lieu au laboratoire. Au cours du tri des espèces, l'observateur répartit un total de 6 points entre les espèces les mieux représentées dans la poignée, en proportion du volume relatif qu'elles occupent. La sommation des points obtenus par une espèce dans les 40 poignées d'un même traitement

et une simple règle de trois permettent de calculer son *biovolume relatif* dans ce traitement. L'examen des abaques de Fisher et Yates donnant l'intervalle de confiance d'une probabilité P en fonction d'une fréquence relative mesurée F, au seuil 5 p. 100 (voir tabl. 2 et 3) permet de mettre en évidence la signification des effets des traitements.

Cette analyse a donc fourni les éléments d'une étude des relations entre les plantes spontanées et la fétuque élevée.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. — *Rendement et pérennité de l'espèce semée* (tabl. 1)

1. *Comportement comparé du dactyle Prairial et de la fétuque S 170.*

a) *Comportement au cours des trois premières années.*

Quel que soit le traitement, les deux espèces ne diffèrent pas significativement en ce qui concerne les productions cumulées sur trois ans.

Mais, au cours des trois années, les productions baissent significativement chez le dactyle dans tous les traitements ; la production moyenne de cette espèce est 7,3 t/ha en 1967, 6,5 t/ha en 1968 et 6,0 t/ha en 1969. Les productions sont plus stables

TABLEAU I

Production des parcelles et couverture de l'espèce semée

Traitements			Dactyle			Fétuque élevée			
			PM	AE	C	PM	AE	C	BV
A	D	N_1	4,2	6,0	83	4,6	7,2	43	39,1
		N_2	5,3	4,4	65	5,1	—	12	13,7
	10	N_1	5,7	5,8	87	6,5	7,9	55	57,5
		N_2	6,9	4,5	73	6,8		20	27,1
B	D	N_1	6,3	6,9	97	6,6	9,1	68	63,7
		N_2	7,6	5,4	83	7,9	—	26	46,2
	10	N_1	8,4	6,6	95	8,1	9,5	77	60,4
		N_2	9,1	5,2	87	8,8	—	33	47,5

PM : Production moyenne des 3 années de traitement en MS t/ha (1967-68-69) ;
AE : Arrière-effet du régime de pâture = production de l'année 1970 en MS/t/ha ;
C : Pourcentage de surface couverte par l'espèce semée (août 1970) ;
BV : Biovolume (juillet 1970).

chez la fétuque, elles sont respectivement 7,1 t/ha, 6,7 t/ha et 6,5 t/ha (ARNAUD, 1972).

Parallèlement, les peuplements n'ont pas été affectés visiblement de 1967 à 1969 ; l'espèce semée occupait l'espace vital sans failles importantes jusqu'à l'automne 1969.

b) *Comportement après l'automne 1969.*

Le rendement de la fétuque élevée en 1970 atteint le même niveau qu'en 1967 (à traitements équivalents) malgré la destruction partielle du peuplement à l'automne 1969.

Par contre, le rendement du dactyle Prairial en 1970 reste inférieur à celui de la fétuque S 170 et inférieur au rendement de 1967 (à rythme identique), qu'il y ait eu ou non destruction d'une partie du peuplement.

La dégradation des peuplements après l'automne 1969 est consécutive à un accident de végétation dû à la succession d'une période tiède et d'une chute brutale des températures. La dernière pâture de l'année 1969 a eu lieu le 9 octobre, date après laquelle les repousses sont normalement minimes ; mais, cette année-là, les conditions climatiques ont permis une repousse :

— du 10 au 31 octobre, température moyenne 10,8° ;
— du 1er au 13 novembre, température moyenne 6,6°.

Le froid et la première chute de neige sont arrivés brutalement sur les jeunes repousses, occasionnant des dégâts importants ; effectivement d'après Dale Smith (1964) « des températures douces et une abondante humidité du sol, conditions favorables à la croissance, peuvent retarder le développement de l'endurcissement au froid même en jours courts ».

Toutefois, l'intensité de dégradation des peuplements varie considérablement selon l'espèce (tabl. 1). Le dactyle a été relativement peu touché tandis que la fétuque perd beaucoup en densité.

L'adaptation aux conditions d'altitude de l'espèce *Dactylis glomerata* est dans son ensemble certainement supérieure à celle de *Festuca arundinacea* : dans toutes les montagnes d'Europe occidentale, on trouve des dactyles au-delà de la limite des fétuques élevées.

c) *Discussion.*

Certains éléments de la morphologie et de la biologie des deux variétés permettent de formuler une hypothèse sur l'évolution particulière des rendements et des peuplements apparemment contradictoires : le dactyle maintient son peuplement mais décroît en rendement, tandis que la fétuque baisse en densité mais maintient son rendement.

Cette évolution dépendrait du port de la plante et de son comportement en régime de pâture.

La fétuque élevée S 170 a un port dressé et couvre mal le sol : ses talles drageonnent plus ou moins autour de la touffe primitive. De ce fait, dans les conditions de notre essai, c'est-à-dire, climat montagnard et pâturage par le mouton, toute trace de la ligne de semis a disparu au bout de trois ans ; les nouvelles talles peuvent former des racines et étaler leur feuillage dans un espace relativement libre. Le peuplement est en perpétuel mouvement ; en cas de conditions défavorables, par exemple, l'accident de végétation observé à l'automne 1969, il s'ouvre facilement aux espèces spontanées mieux adaptées. En revanche, les talles de fétuque peuvent bénéficier intensément des facteurs favorables grâce à leur position relativement dégagée, et les rendements se maintiennent au cours des ans.

Le dactyle Prairial présente un port en touffes denses et serrées sous le régime

de pâturage ; les talles ne drageonnent pas et restent dépendantes de la touffe ; le peuplement se maintient en touffes restant disposées dans l'axe des lignes de semis malgré 3 ans de pâture. Entre les touffes existent des vides où aucune plante ne semble pouvoir s'installer. Les jeunes talles doivent étendre leurs racines dans le feutrage serré de la touffe et développer leur feuillage au milieu des organes aériens des talles plus anciennes ; le plateau de tallage a tendance à former un coussinet qui s'épaissit avec le temps, créant un milieu de plus en plus défavorable à la vitalité des jeunes talles : ainsi, les rendements décroissent au cours des ans mais la protection contre le froid est bonne et favorise le maintien d'un peuplement pur.

Un phénomène analogue a été observé dans un essai voisin cultivé avec diverses variétés de fléole : Maintenon dont le port est dressé, a davantage souffert du froid que la variété Pécora dont le port est plus bas et plus serré.

2. *Action de la fumure azotée.*

Le rendement augmente avec la fertilisation azotée chez la fétuque et le dactyle grâce à la stimulation de croissance obtenue dans la période de pousse qui suit immédiatement l'épandage.

Mais on observe une arrière-action sur le dactyle en 1970 de la fertilisation azotée de 1969 : les dégâts dus au froid sont plus grands dans les parcelles N_2 qu'en N_1 et les doses appliquées en 1970 (250 et 500 N respectivement) ne suffisent pas à compenser cette arrière-action.

Ce fait s'expliquerait par le taux des réserves glucidiques en relation avec le niveau de la fertilisation azotée durant l'été 1969 et peut-être aussi, par un certain déséquilibre de la nutrition N-K.

En ce qui concerne ce dernier point, LEFEBVRE-DROUET (non publié) et Mac LEOD (1965) notamment ont montré que l'alimentation potassique agit sur le métabolisme des glucides. Mac LEOD a, en particulier, mis en évidence une interaction nette entre N et K : lorsque K augmente, les réserves glucidiques diminuent en présence d'un faible niveau azoté, et augmentent en présence d'une fertilisation azotée élevée.

Notons toutefois qu'ici, le déséquilibre de la fertilisation N-K (250 N-120 K_2O et 500 N-120 K_2O en 1969) est tempéré par les restitutions des moutons ; ces restitutions se font surtout par les urines, et, en pâturage rationné avec une charge instantanée élevée, on peut admettre qu'elles sont assez bien réparties ; on observe corrélativement une assez bonne homogénéité de la végétation à l'intérieur de la parcelle.

L'action directe de la fertilisation azotée sur les teneurs en glucides solubles totaux est beaucoup plus importante. Nous avons observé cette action dans les parties aériennes d'*Agrostis tenuis* à Laqueuille en 1971 : le 29 septembre, un mois après la coupe, les teneurs observées étaient respectivement de 6,9 p. 100 et de 3,6 p. 100 pour un apport nul ou égal à 120 N/ha.

Sur dactyle, LEFEBVRE et JOLIET (1968) observent « une certaine différenciation dans les teneurs en glucides solubles totaux en fonction des apports azotés (valeurs fortes pour faibles apports d'azote et réciproquement) ».

Sur dactyle également, AUDA et BLASER (1966) ont montré que les teneurs en glucides solubles décroissent de 25 à 8 p. 100 de la matière sèche lorsque les doses d'azote appliquées annuellement croissent de 0 à 400 kg/ha et d'autre part, d'après DALE SMITH (1964), « les sucres sont la principale source d'énergie... dans le processus

physiologique d'endurcissement au froid... » et « les plantes à bas niveau de réserves ne peuvent acquérir un fort endurcissement ».

Ainsi, sans exclure l'hypothèse d'un effet amplificateur dû au déséquilibre de la fumure N-K plus accentué sur les parcelles N_2, on peut retenir que les fortes fumures azotées entraînent une baisse des teneurs en glucides et une diminution de la résistance au froid.

Cette moindre résistance se traduit dans notre essai sur le dactyle par l'obtention en 1970, de rendements plus faibles en N_2 qu'en N_1 bien que la dose d'azote appliquée en N_2 soit toujours le double de celle appliquée en N_1 (perte de 1,45 t/ha en N_2 par rapport à N_1).

L'arrière-action de la fumure azotée s'observe aussi dans la variation de la densité des peuplements de l'espèce semée. La fétuque élevée par son port particulier perd davantage en densité que le dactyle, mais dans les deux cas, l'arrière-action de la dose N_2 se traduit par une densité plus faible qu'en N_1 où les plantes sont plus riches en glucides.

3. *Action du rythme d'exploitation.*

a) *Action directe.*

Le rythme d'exploitation a une action directe sur les rendements du dactyle Prairial et de la fétuque S 170.

Les rendements diminuent lorsqu'on augmente l'intensité d'exploitation, soit par une plus grande précocité de la première exploitation, soit par l'accélération du rythme de pâture, soit, davantage encore, par la combinaison de ces deux facteurs.

Ward et Blaser (1961) notent chez le Dactyle, l'influence prépondérante du niveau des réserves glucidiques sur la vitesse de repousse jusqu'au 25e jour après la coupe.

Or Reynolds (1969), Baker et Garwood (1961) ont montré que les teneurs en glucides solubles du Dactyle diminuent lorsqu'on accélère le rythme d'exploitation. Ces faits d'observation permettraient d'expliquer les variations de rendement constatées dans notre essai : le rendement serait une fonction croissante du niveau moyen des réserves en début de repousse, lui même fonction du rythme d'exploitation.

b) *Arrière-action.*

D'après ce que nous venons de dire, le rythme d'exploitation a un effet direct sur les teneurs en glucides solubles. Ces teneurs ont précisément d'après Dale Smith une très grande importance dans la résistance au froid. Les réactions au froid à l'automne 1969 devraient donc dépendre aussi du rythme d'exploitation. Nous observons effectivement une arrière-action des rythmes appliqués en 1969 sur les peuplements et sur les rendements observés en 1970, conforme à cette prévision :

La date de la 1re pâture a une arrière-action faible sur le rendement de la fétuque et nulle sur le dactyle ; le rythme des pâtures a une arrière-action importante sur la fétuque (perte de 1,7 t/ha en moyenne en rythme rapide) et modérée sur le dactyle (perte de 0,85 t/ha en moyenne en rythme rapide). Cette évolution des rendements est parallèle à celle des peuplements des deux espèces, la fétuque étant plus affectée que le dactyle et la densité du peuplement de l'espèce semée diminuant avec l'intensité du rythme appliqué en 1969.

4. *Conclusion sur le comportement de la plante semée.*

Ainsi, le rôle des glucides solubles serait très important et expliquerait l'action des différentes combinaisons du rythme de pâture et de la fertilisation azotée. Une fertilisation azotée trop élevée jointe à un rythme de pâture rapide peut aboutir à des accidents préjudiciables à la pérennité du peuplement de la plante semée. La fétuque élevée S 170 se révèle plus sensible au froid que le dactyle Prairial en raison, semble-t-il, des diverses particularités morphologiques et biologiques qui distinguent ces deux variétés. Notons aussi que l'aire de l'espèce Dactyle s'étend davantage en altitude que celle de l'espèce Fétuque élevée.

Étudions maintenant les espèces spontanées qui ont réussi à s'introduire dans le peuplement le plus dégradé, celui de la fétuque S 170.

B. — *Le peuplement de la fétuque élevée S 170 et des espèces spontanées*

Dans ce chapitre, nous étudierons l'arrière-effet des traitements sur les relations entre la fétuque S 170 et les plantes spontanées tel qu'il apparaît au cours de l'été 1970.

« Le comportement d'une espèce dépend de ses aptitudes à exploiter le milieu à son profit, mais aussi des aptitudes de ses voisines » (RHODES, 1970).

L'examen des tableaux 2 et 3 met en évidence que l'arrière-effet d'un traitement dépend souvent, très strictement, du niveau des autres facteurs. Nous insisterons donc dans notre analyse sur les arrière-effets combinés les plus favorables à chacune des espèces rencontrées.

TABLEAU 2

Prairie de fétuque élevée

Biovolumes : Arrière-effets moyens des traitements

	Rythme		Doses d'azote		Stade de 1re Pâture	
	A	B	N_1	N_2	Déprimage	Épi à 10 cm
Fétuque S 170	34,3 ± 3,2	54,4 ± 3,0	55,1 ± 3,0	33,6 ± 3,2	40,7 ± 4,4	48,1 ± 3,1
Agrostis tenuis	31,0 ± 3,1	17,7 ± 2,6	20,1 ± 2,7	28,6 ± 3,1	25,8 ± 3,0	22,9 ± 2,9
Poa annua	13,2 ± 2,4	9,6 ± 1,9	4,0 ± 1,3	18,8 ± 2,7	12,7 ± 2,3	10,2 ± 2,2
Poa pratensis	4,3 ± 1,3	5,7 ± 1,7	3,7 ± 1,3	6,3 ± 1,7	6,9 ± 1,8	3,1 ± 1,1
Trifolium repens ...	7,8 ± 1,8	1,1 ± 0,7	4,5 ± 1,6	4,4 ± 1,6	5,0 ± 1,7	3,9 ± 1,3
Taraxacum officinale	4,9 ± 1,4	2,9 ± 1,1	5,6 ± 1,7	2,2 ± 1,0	3,6 ± 1,3	4,1 ± 1,4
Poa trivalis	1,7 ± 1,0	2,9 ± 1,1	2,5 ± 1,0	2,1 ± 1,0	2,7 ± 1,1	1,9 ± 1,0
Divers	2,8	5,7	4,5	4,0	2,6	5,8

Le peuplement de la fétuque élevée a été d'autant plus diminué par le froid que le niveau probable des réserves à l'automne 1969 était bas : telle est l'hypothèse que nous avons pu faire pour expliquer l'arrière effet des traitements appliqués. Ainsi, nous avons vu que la variété S 170 est d'autant plus sensible au froid que le rythme

d'exploitation a été rapide et la fertilisation azotée élevée ; l'influence du déprimage est défavorable, mais faible.

La combinaison la plus favorable est « rythme lent + dose moyenne d'azote » ; le stade de première pâture n'a d'influence sur le peuplement de la fétuque qu'en rythme rapide.

TABLEAU 3

Prairie de fétuque élevée
Biovolumes : Effets combinés

	Rythme A (rapide = 3 semaines entre 2 pâtures)			
	Déprimage		Stade 10 cm	
	N_1	N_2	N_1	N_2
Fétuque S 170	39,1 ± 7,1	13,7 ± 5,1	57,5 ± 6,5	27,1 ± 6,4
Agrostis tenuis	30,0 ± 6,3	34,1 ± 7,1	16,6 ± 5,4	43,3 ± 7,3
Poa annua	5,4 ± 3,8	29,1 ± 6,1	6,2 ± 4,0	12,1 ± 4,9
Poa pratensis	5,4 ± 3,8	7,9 ± 4,3	0,8 ± 2,5	3,3 ± 2,6
Trifolium repens	9,2 ± 4,6	7,5 ± 4,1	5,8 ± 3,9	8,7 ± 4,5
Taraxacum officinale	7,5 ± 4,1	2,9 ± 2,4	5,8 ± 3,9	3,3 ± 2,6
Poa trivialis	0,8 ± 2,2	2,0 ± 2,3	3,7 ± 3,0	0,5 ± 1,6
Divers	2,6	2,8	3,6	1,8
	Rythme B (lent = 6 semaines entre 2 pâtures)			
Fétuque S 170	63,7 ± 6,4	46,2 ± 7,1	60,4 ± 6,1	47,5 ± 7,1
Agrostis tenuis	16,2 ± 5,4	22,9 ± 5,8	17,5 ± 5,6	14,1 ± 5,2
Poa annua	2,5 ± 2,5	13,7 ± 5,0	2,0 ± 2,3	20,4 ± 5,7
Poa pratensis	5,0 ± 3,3	9,5 ± 4,7	3,7 ± 2,6	4,6 ± 3,4
Trifolium repens	2,5 ± 2,5	0,8 ± 2,2	0,4 ± 1,6	0,8 ± 2,2
Taraxacum offiinale	3,3 ± 2,5	0,8 ± 2,2	5,8 ± 3,9	1,7 ± 2,3
Poa trivialis	4,2 ± 3,8	3,7 ± 2,6	1,2 ± 2,3	2,5 ± 2,5
Divers	2,6	2,4	9,0	8,4

Pour les espèces spontanées, les possibilités d'installation sont en étroite relation avec l'espace libéré par la fétuque élevée, mais cet espace est diversement occupé selon leur écologie, leurs aptitudes relatives et la présence de semences viables (DELPECH, 1969).

On constate, en comparant l'arrière-effet des différents traitements que chaque recul de la fétuque élevée profite principalement à l'une des deux espèces *Agrostis tenuis* ou *Poa annua.*

1. *Agrostis tenuis.*

Le type d'agrostide présent dans les Monts Dore est une plante fertile et rustique ; ses semis colonisent facilement le bord des chemins et les terres remuées, même caillouteuses. Elle semble beaucoup moins exigeante que les pâturins en éléments nutritifs. Ces qualités lui permettent de s'installer dans un grand nombre de biotopes ;

dans le cas qui nous occupe, elle s'est révélée capable d'exercer une forte pression sur les peuplements de fétuque élevée pâturée par des moutons.

Les combinaisons des traitements les plus favorables à cette espèce sont : « rythme rapide + déprimage » ou bien « rythme rapide + stade 10 cm + dose forte d'azote ».

2. *Poa annua.*

Le pâturin annuel est une plante nitrophile des lieux intensément fréquentés par les animaux de ferme ; il s'installe là où les déjections animales sont abondantes, lorsque la concurrence des autres plantes a été supprimée par le piétinement intense auquel il est très résistant. Dans cet essai, il est présent dans tous les traitements, grâce au niveau toujours élevé des apports d'azote minéral et des restitutions animales, grâce aussi au port particulier et à la mobilité des touffes de fétuque élevée S 170 qui laissent une part importante de sol nu après un pâturage à ras par les moutons. Les défoliations intenses et le piétinement permettent aux graines d'entrer en contact étroit avec le sol, de germer, et aux plantules de trouver suffisamment de lumière.

Ici, la dose forte d'azote est nécessaire pour permettre un développement important de cette plante ; le déprimage avec rythme rapide d'exploitation est la combinaison la plus favorable.

En résumé, si le rythme d'exploitation est lent, la fétuque élevée garde une place prépondérante, l'agrostide ne peut se développer et le pâturin annuel colonise les parties de sol nu piétinées. Si le rythme est rapide, la fétuque cède le pas surtout au pâturin annuel en cas de déprimage, et surtout à l'agrostide dans l'autre cas.

3. *Autres espèces.*

Les plus forts déplacements d'équilibre entre espèces s'observent entre la fétuque élevée, l'agrostide et le pâturin annuel. Toutefois, les autres espèces occupent un volume important compris entre 17 et 25 p. 100. Examinons le comportement des principales :

Poa pratensis. — Le pâturin des prés possède des rhizomes ; il résiste bien au piétinement et au broutage à ras par le mouton. Le biotype des Monts Dore se développe abondamment dans les lieux de parcage de moutons ; on retrouve ici le caractère nitrophile. Il est fréquent et caractéristique dans les prairies mésophiles intensément pâturées où il voisine avec *Trifolium repens*, *Festuca rubra* et *Agrostis tenuis*. Il se développe aussi abondamment dans des prairies de fauche bien fertilisées. Ces observations cadrent bien avec l'absence d'effet du rythme d'exploitation constaté dans l'essai.

Ici, *Poa pratensis* relativement exigeant en lumière et normalement dominé au démarrage de la végétation par la fétuque élevée, est favorisé par le déprimage : sa réponse au déprimage s'expliquerait par une meilleure photosynthèse à la suite de la défoliation des espèces dont le feuillage est plus aérien et plus facilement brouté que le sien à cette saison.

Trifolium repens. — Le trèfle blanc des pâturages des Monts Dore est une plante étroitement subordonnée à la pâture intense. Son exigence en lumière s'exprime ici par sa réponse positive au rythme rapide. Cependant le déprimage n'a pas d'effet significatif peut-être parce qu'il se situe à une période encore froide, peu favorable à son

développement. On remarque que la dose d'azote n'a pas d'influence : le facteur important pour la croissance du trèfle blanc est l'énergie lumineuse disponible au niveau de ses feuilles ; celle-ci dépend étroitement du développement relatif des graminées qui sont très dominantes dans les parcelles N_1 comme dans les parcelles N_2.

Taraxacum officinale. — Le pissenlit se montre lui aussi sensible à la lumière par sa réponse positive au rythme rapide. Il a réagi négativement à la dose forte d'azote.

CONCLUSIONS

Le comportement de la plupart des espèces spontanées que nous avons rencontrées dans cet essai était déjà assez bien connu ; il nous a paru important de montrer le comportement des écotypes des Monts Dore dans un essai où domine au départ une plante semée, issue de sélection. Les résultats montrent que les plantes spontanées ne prennent place que lorsque l'espèce semée présente des inadaptations. On observe ce cas chez la fétuque élevée S 170. Par contre, le peuplement de dactyle Prairial, conduit de la même façon, dans un essai contigu, est resté pratiquement pur. L'inadaptation partielle ou totale de la plante semée est donc la première condition au salissement de la prairie temporaire. Ce salissement n'entraîne pas obligatoirement une baisse durable du rendement ; la diminution de densité d'implantation peut être compensée par une vigueur plus grande des pieds restants et par la productivité, non-négligeable, des espèces spontanées.

La comparaison des prairies pâturées de dactyle Prairial et de fétuque élevée S 170 montre une différence d'intensité de l'action des traitements, due aux caractéristiques morphologiques et biologiques de ces deux espèces.

Le rendement du dactyle décroît au cours des ans et celui de la fétuque se maintient, tandis que les apports annuels d'azote ont triplé (ARNAUD, 1962). Cependant, quelle que soit l'espèce, *l'action des traitements* se manifeste selon une orientation constante :

— supériorité de rendement de la dose d'azote double sur la dose simple,
— diminution régulière du rendement lorsque le rythme de pâture s'accroît ; le déprimage ajoute un effet dépressif.

Les arrière-actions observées en été 1970, tant sur le rendement que sur le peuplement, traduisent l'influence des traitements sur la teneur en glucides à l'automne 1969 et, en conséquence, sur la résistance au froid ; les traitements se rangent dans le même ordre, qu'il s'agisse des rendements croissants, ou des taux de couverture croissants de l'espèce semée :

1. rythme 3 semaines, dose 500 N,
2. rythme 6 semaines, dose 500 N,
3. rythme 3 semaines, dose 250 N,
4. rythme 6 semaines, dose 250 N.

L'arrière-action défavorable du déprimage se manifeste seulement sur la fétuque.

Finalement, la conduite des prairies temporaires à Laqueuille en pâturage rationné par les moutons se révèle praticable à condition de respecter certaines règles :

Pour le dactyle Prairial, nous conseillerons la pratique du déprimage, une fré-

quence de pâture de 4 ou 5 semaines et une fertilisation azotée de 200 à 250 unités réparties d'avril à début août (1).

Pour la fétuque élevée S 170, on attendra la réalisation du stade « épi à 5-10 cm » pour la première pâture ; la fréquence des pâtures et la fertilisation azotée seront du même ordre que pour « Prairial ».

Ces conditions d'exploitation permettront de maintenir le niveau des glucides et d'assurer ainsi simultanément un rendement élevé et le maintien d'une forte densité du peuplement de la variété semée.

Reçu pour publication en avril 1973.

REMERCIEMENTS

Nous remercions MM. M. NIQUEUX, et L. GACHON, directeur de la Station d'Amélioration des plantes et directeur de la Station d'Agronomie, des orientations et de l'appui qu'ils nous ont donnés au cours de cette expérimentation.

SUMMARY

SOME ASPECTS OF THE COMPETITION BETWEEN SPONTANEOUS PLANTS AND PLANTS SOWN IN TEMPORARY DACTYL GRASSLAND AND ELEVATED FESCUE IN THE DORE MOUNTAINS. EFFECT OF PASTURE RHYTHM AND NITROGENOUS FERTILIZATION

The behaviour of Dactyl, « Prairial » variety, grassland and elevated Fescue S 170 produced as rationed pasture with sheep was studied from 1967 to 1970 on the volcanic soils of the Auvergne Mountains at an altitude of 1 050 metres at Laqueuille.

Production increases with the level of nitrogenous fertilization ; it decreases when the cultivation rhythm is accelerated.

From 1967 to 1969, the average production of the test decreased, even though the amounts of nitrogen applied increased. Dactyl showed this decrease more than Fescue.

The populations were partially destroyed by cold during the winter of 1969-70 ; Fescue was far more sensitive than Dactyl ; but damage due to cold varied considerably according to the cultivation rhythm and the level of nitrogenous fertilization ; a fast cultivation rhythm and high level of nitrogenous contributions lowered the resistance to cold of both graminaceae ; the hypothesis of a lowering of the rates of total soluble carbohydrates is advanced in both cases as an explanation of the sensitivity to cold.

The invasion of the Fescue grassland by spontaneous species is then discussed ; *Agrostis tenuis* and *Poa annua* are the two which encroach the most.

A method of producing rationed pasture is proposed for temporary grassland of high altitudes.

(1) L'adoption des doses plus élevées exige une meilleure connaissance de l'influence de la fertilisation potassique sur la *pérennité* du peuplement dans ce type de sol et sous ce climat. Une action positive directe d'une fertilisation potassique accrue sur les *rendements* paraît moins probable. Le problème est à l'étude.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE ASPEKTE DES WETTBEWERBS ZWISCHEN WILDWACHSENDEN PFLANZEN UND ANGEBAUTEN PFLANZEN IN AM MONT DORE GEZÜCHTETEN DACTYLIS UND TESTUCA — SAISONWIESEN
EINFLUSS DES WEIDERHYTHMUS UND DER STICKSTOFFDÜNGUNG

Das Verhalten von hochgelegenen Wiesen von Dactylis « Prairial » und Festuca S 170, die einem rationierten Schafweidesystem ausgesetzt wurden, wurde von 1967 bis 1970 auf den vulkanischen Böden der Berge der Auvergne in Laqueuille in 1 050 m Höhe untersucht.

Die Produktion steigt mit dem Ausmass der Stickstoffdüngung an, sie verringert sich, wenn der Bewirtschaftungsrhythmus ansteigt.

Von 1967 bis 1969 sank die durchschnittliche Versuchsproduktion ab, obwohl die verwendete Stickstoffdosis anstieg. Beim Dactylis war die Verringerung stärker spürbar als bei der Festuca.

Die Bepflanzungen wurden während des Winters 1969-70 teilweise durch die Kälte zerstört. Festuca ist viel anfälliger als Dactylis. Aber die Kälteschäden sind sehr verschieden je nach dem Bewirtschaftungsrhythmus und dem Ausmass der Stickstoffdüngung. Ein rascher Bewirtschaftungsrhythmus und eine erhöhte Stickstoffzufuhr verringern die Kältebeständigkeit der beiden Gräser. Die Annahme, dass der Gesamtspiegel der löslichen Kohlehydrate sinkt, wird in diesen beiden Fällen vorgebracht, um die Kälteempfindlichkeit zu erklären.

Die Verschmutzung der Festucawiese durch wilde Gewächse wird diskutiert : *Agrostis tenuis* und *Poa annua* breiten sich am meisten aus.

Es wird weiterhin ein rationiertes Weidesystem für Saisonhochwiesen vorgeschlagen.

РЕЗЮМЕ

Ф. ДЕ МОНТАР, Р. АРНО.

Некоторые аспекты соревнования между дикорастущими растениями и ежой и овсяницей на временных лугах района Монт-Дор. — Влияние ритмов выпаса и внесения азотных удобрений.

Поведение лугов, засеянных ежой « Прериаль » и овсяницей « С 170 », при нормированном выпасе овец, изучалось с 1967 до 1970 на вулканических почвах Овернских гор, на высоте 1 050 метров над у. м., в районе Лякей.

Луговая продукция увеличивается по мере повышения уровня азотных подкормок и уменьшается при ускорении ритма эксплуатации лугов.

С 1967-го по 1969-ый год средняя продукция в опыте уменьшилась, несмотря на увеличение доз внесенного азота. У ежи, уменьшение продукции проявлялось более четко, чем у овсяницы.

Популяции обоих злаков частично погибли от холода зимой 1969-1970; овсяница оказалась гораздо более чувствительной к отрицательным температурам, чем ежа; но размеры повреждений вызванных холодом меняются в зависимости от ритма эксплуатации лугов и уровня азотных подкормок; более интенсивный ритм эксплуатации и повышенный уровень азотного удобрения уменьшают холодоустойчивость обоих злаков; для об'яснения увеличения чувствительности к холоду в этих двух случаях, выдвигается гипотеза уменьшения процентного содержания общих растворимых глюцидов в растениях.

И, в заключение, рассматривается засорение чисто овсяничных лугов характерными дикорастущими травами, среди которых полевица (*Agrostis tenuis*) и мятлик однолетний (*Poa annua*) являются наиболее легко распространяющимися растениями.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNAUD R., 1970. *Comparaison de deux collections de plantes fourragères dans le Massif central* (rapport ronéotypé de la Station d'Amélioration des Plantes de Clermont Ferrand).

ARNAUD R., 1972. Influence du Mode d'Exploitation sur le comportement des prairies temporaires en altitude. *Fourrages*, **50**.

AUDA H., BLASER R. E., BROWN R. H., 1966. Tillering and carbohydrate contents of orchardgrass as influenced by environmental factors. *Crop Sci.*, **6**, 139-143.

BAKER H. K., GARDWOOD E. A., 1961. Seasonal changes in fructosan and soluble sugar contents of cooksfoot herbage. *J. Brit. Grass. Soc.*, **16**, 263-267.

DELPECH R., 1969. Estimation du stock de semences viables dans l'horizon superficiel du sol d'une vieille prairie pâturée de l'Auxois. *3e Colloque sur la biologie des mauvaises herbes*, E. N. S. A. Grignon, 13 décembre 1969.

DELPECH R., BERTOLETTI-DAGET L., 1968. *Plantes des prairies permanentes*. Publications de l'A. C. T. A.

ESTIENNE P., 1956. *Recherches sur le climat du Massif central français*. Publication nº 43 de la Météor. nat.

LEFEBVRE J.-M., JOLIET E., 1968. Étude des variations de la composition protidique et glucidique des parties aériennes du dactyle. II. Influence des fertilisations azotées. *Ann. agron.*, **19** (3), 379-396.

LIBOIS A., 1970. Action de la nutrition minérale sur la production du ray-grass anglais et de la fétuque des prés en culture mixte. *Ve colloque d'Écologie*, Paris.

MACLEOD L. B., 1965. Effect of nitrogen and potassium fertilization on the yield, regrowth and carbohydrate content of the storage organs of alfalfa and grasses. *Agron. J.*, **57**, 345-350.

RHODES I., 1970. Competition between herbage grasses. *Herb. Abstr.* **40** (2), 115-121.

REYNOLDS, 1969. Carbohydrate reserve trends in orchardgrass grown under different cutting frequencies and nitrogen fertilization level. *Crop Sci.*, **9**, 720-723.

SMITH D., 1964. Winter injury and the survival of forage plants. *Herb. Abstr.*, **34**, 203-209.

WARD, BLASER, 1961. Carbohydrate food reserves and leaf area in regrowth of orchardgrass. *Crop Sci.*, **1**, 366-370.

Ann. agron., 1973, **24** (5), 585-613.

VIEILLISSEMENT DE DIVERS ENGRAIS PHOSPHATÉS EN RELATION AVEC LE TYPE DE SOL, ÉTUDIÉ PAR LA MÉTHODE CHANG ET JACKSON

L. GACHON

avec la collaboration technique de Renée DEGOUTTE-DOPARIS

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
63100 Clermont Ferrand

RÉSUMÉ

Le fractionnement du phosphore est effectué selon la méthode CHANG et JACKSON sur des échantillons de sols marqués à ^{32}P et issus :

— soit de champs d'essais de longue durée,

— soit d'essais en vases où différents engrais phosphatés ont été laissés pendant trois ans au contact de sols de types variés.

Les engrais expérimentés sont : le superphosphate, le phosphate bicalcique précipité, les scories, le phosphate naturel, le phospal et l'engrais liquide 14-48.

La méthode CHANG et JACKSON est apparue mal appropriée pour étudier le vieillissement des engrais principalement en sols calcaires. Par le marquage du sol à ^{32}P, on a néanmoins pu déterminer le degré de labilité du phosphore extrait dans chaque fraction et suivre ainsi la transformation des divers engrais.

Le vieillissement est le plus rapide pour les engrais solubles dans l'eau, qui réagissent le plus fortement avec le sol. Les conséquences paraissent moins graves en sols acides où les produits de réaction demeurent vraisemblablement accessibles aux racines, mais où le phosphate naturel et le phospal évoluent incomplètement.

En sols calcaires, si le phosphate naturel demeure pratiquement insoluble, le phosphate bicalcique précipité vieillirait moins rapidement que les phosphates solubles tout en demeurant sous une forme assimilable.

I. — INTRODUCTION

Dans un mémoire précédent (GACHON, 1972), nous avons montré que la méthode de fractionnement du phosphore proposée par CHANG et JACKSON (1957) [1] apparaissait mal appropriée à apprécier la fertilité phosphorique des sols.

[1] En abrégé, C. et J. dans la suite du texte.

Dans ce second mémoire, la méthode C. et J. est utilisée pour étudier les variations à moyen terme de la distribution du phosphore apporté par divers engrais en fonction des caractéristiques chimiques du sol et de l'engrais. L'objectif est aussi de rechercher dans quelle mesure cette distribution peut fournir à la fois une image du vieillissement que subissent dans le sol les engrais phosphatés et une indication de leur efficacité.

Grâce au marquage préalable du sol à ^{32}P, nous avons étudié simultanément la répartition du pool labile entre les fractions ainsi distinguées afin de dégager l'aptitude de chacune d'elles à fournir des ions phosphates aux cultures ; cette préoccupation est, en effet, essentielle pour l'agronome.

Le terme de vieillissement souvent utilisé dans le texte peut prêter à confusion et mérite donc d'être précisé. Pour notre part, *le vieillissement traduit l'ensemble des changements que sont susceptibles de subir, au cours du temps, les engrais phosphatés incorporés au sol.*

Le devenir des phosphates minéraux apportés par les fumures a fait l'objet de nombreux travaux mettant en œuvre la technique de C. et J. (Chang et Jackson, 1958 ; Laverty et Mc Lean, 1961 ; Kaila, 1963 ; Manning et Salomon, 1965 ; Glintic, 1966 ; Singh *et al*, 1966 ; Khanna, 1967 ; Shelton et Coleman, 1968 ; Smith, 1968 ; Libiseller, 1969 ; Dabin, 1970 ; Lawrence Massey *et al*, 1970 ; Hernando *et al*, 1971 ; Zhukov et Gorina, 1971 ; Fardeau et Marini, 1971 ; Khanna et Mahajan, 1971).

On peut conclure de toutes ces études antérieures que la distribution du phosphore apporté par les engrais dépend :

— principalement des caractéristiques chimiques du sol (surtout du pH),
— mais aussi, des propriétés physiques et chimiques de l'engrais,
— de la durée du temps de contact entre le sol et l'engrais,
— enfin, des conditions climatiques (humidité du sol).

C'est ainsi qu'en présence d'engrais relativement solubles dans l'eau, la majorité des auteurs soulignent l'enrichissement préférentiel de P-Al à court terme, se déplaçant rapidement vers P-Ca en sols calcaires ou seulement proches de la neutralité et beaucoup plus lentement vers P-Fe en sols acides. Au contraire, en présence d'apports sous forme de phosphates naturels, la répartition du phosphore ajouté est différente dans la mesure où l'empreinte originelle liée à la forme (prépondérance initiale de P-Ca en l'occurrence) persiste longuement en raison d'une évolution chimique beaucoup plus lente.

II. — MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude porte sur dix sols représentant les types les plus fréquemment observés en Auvergne dont nous rappelons brièvement la nature (1).

— 3 sols calcimagnésiques carbonatés nettement argileux (Saint-Yvoine — Aigueperse et Crouelle),
— 2 sols bruns lessivés (Saint-Amant-Roche-Savine),
— 1 sol andique humifère (Orcival).

(1) Pour plus de renseignements, cf. Gachon (1972).

A. — *Vieillissement au champ*

Pour deux d'entre eux, il s'agit d'échantillons prélevés à l'issue d'expériences culturales de longue durée mettant en jeu soit des fumures différentes (Crouelle), soit des formes variées d'engrais phosphatés appliqués à plusieurs doses (Saint-Amant nº 2).

B. — *Vieillissement en pots*

Les quatre autres ont été enrichis en mars 1966 par divers phosphates dont les formes solides ont été préalablement broyées et tamisées à 0,160 mm, calibre maximum des scories. La nature et le taux de P_2O_5 total des divers engrais expérimentés sont les suivants :

— superphosphate simple à 16 p. 100 ;
— phosphate bicalcique précipité anhydre à 43,8 p. 100 ;
— phosphate naturel (origine Gafsa) à 30,05 p. 100 ;
— scories de déphosphoration à 17,8 p. 100 ;
— phosphate aluminocalcique calciné (phospal) à 34,1 p. 100 ;
— engrais liquide 14-48 à 48,05 p. 100 (en volume), solution de base de phosphates d'ammonium qui sert à la préparation de nombreuses formules d'engrais liquides et dans lequel 40 p. 100 du phosphore est sous forme « ortho », 43 p. 100 sous forme « pyro » et le complément sous des formes plus condensées.

Ces sols ont reçu des apports de 100 et 200 p.p.m. de phosphore (P) à l'exception du sol d'Orcival où les doses ont été doublées en raison de son énorme pouvoir fixateur. Après avoir été soigneusement homogénéisés puis humidifiés, les échantillons ont été conservés dans des pots de terre cuite placés à l'abri de la pluie mais subissant les variations climatiques de la température. Ils ont été périodiquement arrosés pour provoquer des alternances d'humidité analogues à celles qu'ils subissent dans les conditions naturelles.

En janvier 1969, soit après un temps de contact proche de 3 années, des prélèvements moyens ont été réalisés dans chaque traitement. Mais, outre les « témoins » qui n'ont pas reçu d'engrais et qui servent de références, seuls ont été étudiés les traitements ayant reçu les doses les plus élevées.

C. — *Déterminations analytiques*

Les déterminations suivantes ont été effectuées soit directement sur les échantillons globaux, soit sur les divers extraits obtenus successivement par la méthode C. et J. modifiée selon HANOTIAUX (1964) [1] :

— le phosphore labile (e) obtenu après une dilution isotopique de trois semaines ;
— et le phosphore minéral (m), le rapport $100\ \frac{e}{m}$ représentant le degré de labilité du phosphore dosé.

III. — RÉSULTATS

Les résultats sont rassemblés dans un tableau unique pour chaque sol étudié tandis que les figures 1 et 2 regroupent certaines données partielles recueillies sur l'ensemble des six sols étudiés.

A. — ESSAIS EN POTS

Tous les traitements étant soumis aux mêmes conditions expérimentales après avoir reçu les différents engrais, nous admettons *a priori* que les différences observées entre les pots « témoins » et les pots « avec engrais » traduisent exclusivement l'effet

[1] Les techniques analytiques sont décrites en détail dans GACHON (1972).

de chaque engrais. Pour cette raison, nous avons choisi de faire figurer sur les différents tableaux :

— pour le témoin sans engrais qui sert de référence, les valeurs *absolues* du phosphore dosé,

— et pour les traitements « avec engrais » les *écarts* calculés par différence avec les valeurs précédentes.

1. — *Rendzine argileuse de Saint-Yvoine* (tabl. 1)

a) *Bilan du phosphore.*

La détermination du phosphore total permet de retrouver approximativement tout le phosphore introduit puisque les écarts entre les pots enrichis et le témoin sont compris entre 185 et 200 p.p.m. Cette fluctuation est acceptable : elle résulte non seulement des défauts d'homogénéité liés à l'application des engrais et au prélèvement des échantillons, mais aussi des erreurs commises dans les déterminations analytiques (erreur relative sur P total de 1,5 p. 100 en moyenne).

b) *Phosphore labile.*

Par contre, après 3 ans de vieillissement, *on ne retrouve sous forme labile qu'une partie, d'ailleurs variable, du phosphore introduit* : 55 p. 100 du bicalcique, 28 à 37 p. 100 des super, scories, phospal et liquide 14-48 non significativement différents entre eux, pratiquement rien du phosphate naturel qui n'a donc pas participé aux échanges ioniques. Ces résultats sont conformes aux observations antérieures, en particulier à celles de SUTTON et LARSEN (1969) qui estiment à 2 ou 3 ans le plus souvent (1 à 6 ans parfois) le temps nécessaire pour que le phosphore du superphosphate perde 50 p. 100 de sa labilité initiale, *exprimée par la valeur L.*

c) *Fractionnement du phosphore.*

Le fractionnement du phosphore minéral confirme également les connaissances acquises selon lesquelles on retrouve dans la fraction P-Ca, largement dominante dans un tel sol carbonaté, la majorité du phosphore introduit, c'est-à-dire : tout le phosphore naturel et 64 à 82 p. 100 des autres engrais. Mais cet enrichissement de P-Ca ne comprend qu'une faible part d'ions labiles. Il ne représente que 12 à 24 p. 100 du phosphore retrouvé, soit encore 30 à 38 p. 100 de l'augmentation du phosphore autodiffusible pour les engrais autres que le phosphate naturel, pour lequel ces taux sont nuls.

Le principal complément du phosphore ajouté est retrouvé dans les fractions « facilement solubles » (colonnes 3 et 4) où il représente 27 p. 100 du bicalcique et 14 à 20 p. 100 des autres formes. Il est intéressant de souligner et de confirmer que *cet enrichissement est le fait d'ions labiles dans leur totalité* compte tenu de la précision des mesures.

Par ailleurs, si l'apport d'engrais n'a pas modifié la quantité de phosphates solubilisés par NH_4F et NaOH, il est curieux de constater que, le cas particulier du phosphate naturel mis à part, un reste est toujours présent dans la dernière fraction résiduelle (colonne 8) où il représente approximativement 20 p. 100 des ions labiles retrouvés. Le fait que ce reste soit constitué dans sa totalité par des ions labiles

TABLEAU 1

Rendzine argileuse de Saint-Yvoine

(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe)		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8	
Témoin	8,3														
P minéral (*m*)* ...		620	*100*	5	*0,8*	1,5	*0,25*	2,5	*0,4*	3	*0,5*	330	*53*	250	*40*
P labile (*e*)		**44**	*100*	**4**	*9*	**1,7**	*4*	**0,4**	*0,9*	**3**	*6,6*	**19**	*42*	**14**	*32*
100 *e*/*m*		7,1		80		113		16		100		5,8		5,6	
Superphosphate **	8,2														
ΔP minéral (*m*)*		+ 190	*100*	+ 23	*12*	+ 7	*4*	0		0		+ 140	*74*	+ 10	*5*
ΔP labile (*e*)		+ **64**	*100*	+ **22**	*34*	+ **7**	*11*	**0**		**0**		+ **20**	*31*	+ **12**	*19*
100 *e*/*m*		34		96		100						14		120	
*Bicalcique***	8,3														
ΔP minéral (*m*)*		+ 195	*100*	+ 42	*21*	+ 11	*6*	0		— 0,5		+ 135	*64*	+ 20	*10*
ΔP labile (*e*)		+ **107**	*100*	+ **42**	*39*	+ **11**	*10*	+ **tr**		**0**		+ **32**	*30*	+ **23**	*21*
100 *e*/*m*		55		100		100						24		115	
*Scories***	8,3														
ΔP minéral (*m*)*		+ 200	*100*	+ 20	*10*	+ 7	*3,5*	0		0		+ 165	*82*	+ 10	*5*
ΔP labile (*e*)		+ **56**	*100*	+ **19**	*34*	+ **6**	*11*	**0**		**0**		+ **19**	*34*	+ **11**	*20*
100 *e*/*m*		28		95		85						12		110	
*Phosphate naturel*** ...	8,35														
ΔP minéral (*m*)*		+ 190	*100*	0		0		0		— 0,5		+ 200	*105*	— 5	— *2,5*
ΔP labile (*e*)		+ **1**		**0**		**0**		**0**		— **0,5**		+ **1**		**0**	
100 *e*/*m*		tr										tr			
*Phospal***	8,2														
ΔP minéral (*m*)*		+ 185	*100*	+ 25	*13,5*	+ 7	*4*	+ 1		0		+ 130	*70*	+ 15	*8*
ΔP labile (*e*)		+ **68**	*100*	+ **26**	*38*	+ **6,5**	*10*	**0**		— **0,5**		+ **26**	*38*	+ **13**	*19*
100 *e*/*m*		37		104		93						20		86	
*Liquide 14-48***	8,3														
ΔP minéral (*m*)*		+ 190	*100*	+ 28	*15*	+ 10	*5*	+ 1		0		+ 130	*68*	+ 20	*11*
ΔP labile (*e*)		+ **71**	*100*	+ **27**	*38*	+ **9**	*13*	+ **tr**		**0**		+ **21**	*30*	+ **18**	*25*
100 *e*/*m*		37		96		90						16		90	

* Dans les colonnes 2 et 8, il s'agit de phosphore total, incluant P organique.

** Écarts par comparaison au témoin.

confirme la valeur de la dernière hypothèse formulée précédemment (GACHON, 1972) de la formation d'un précipité de $CaSO_4$ servant de support à la « resorption » d'une partie des ions phosphoriques solubilisés par H_2SO_4. Il indique également que cette « resorption » s'effectue à partir des ions passant les premiers en solution sous l'action du réactif sulfurique, c'est-à-dire à partir des ions les plus mobiles touchés par les échanges isotopiques antérieurs. *Le partage des ions labiles entre les deux dernières fractions apparaît donc artificiel.*

2. — *Sol brun calcaire d'Aigueperse* (tabl. 2)

a) *Bilan du phosphore.*

Les fluctuations du phosphore total de part et d'autre de la dose d'enrichissement demeurent dans les mêmes limites que pour le sol précédemment étudié : + 185 à 205 p.p.m.

b) *Phosphore labile.*

Au niveau des ions labiles, le vieillissement des différentes formes d'engrais phosphatés confirme également les résultats observés à Saint-Yvoine. Le phosphate bicalcique conserve une position privilégiée : 52 p. 100 du phosphore introduit est retrouvé sous forme labile à l'opposé du phosphate naturel qui n'a pratiquement pas enrichi le pool labile, tandis que, des quatre autres formes placées en situation intermédiaire, seules les scories présentent une perte apparente de labilité plus marquée.

c) *Fractionnement du phosphore.*

Mis à part le phosphate naturel, les engrais se sont distribués de manière semblable entre les diverses fractions séparées, même pour ce qui concerne les ions labiles qui sont évidemment les plus intéressants pour l'agronome. C'est ainsi *qu'on retrouve 36 à 49 p. 100 du phosphore labile dans les fractions « les plus solubles »* (P-eau + P-NH_4Cl), *6 à 13 p. 100 dans P-Al et 33 à 56 p. 100 dans P-Ca alors que P-Fe n'est pratiquement pas modifié.*

Comme dans le sol calcaire précédent, l'enrichissement de P-eau et P-NH_4Cl s'effectue grâce à des ions en totalité labiles, mais le degré de labilité du phosphore retrouvé dans P-Ca est ici un peu moins bas : 18 à 34 p. 100, mais seulement 10 p. 100 pour les scories.

Enfin les ions labiles sont encore présents mais en faible quantité dans la fraction résiduelle (colonne 8). Des phénomènes de « resorption » dus à l'apparition de précipités de $CaSO_4$ lors du traitement par H_2SO_4 demeurent possibles en raison de la tendance qui semble lier les 2 dernières fractions séparées.

3. — *Sol andique d'Orcival* (tabl. 3)

a) *Bilan du phosphore.*

On retrouve avec une approximation normale le phosphore introduit par les différents engrais.

TABLEAU 2

Sol brun calcaire d'Aigueperse

(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe)		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8	
Témoin	7,9														
P minéral (m)*		880	*100*	20	*2,3*	3	*0,4*	30	*3,4*	5	*0,6*	366	*42*	375	*43*
P labile (e)		**96**	*100*	**18**	*19*	**2**	*2*	**7,5**	*8*	**4,6**	*4,7*	**47**	*49*	**9**	*9,5*
100 e/m		10,9		90		67		25		92		13		2,5	
*Superphosphate***	7,9														
ΔP minéral (*m*)*		+ 205	*100*	+ 22	*11*	+ 4,5	*2*	+ 23	*11*	+ 0,5		+ 138	*67*	+ 10	*5*
ΔP labile (*e*)		+ **73**	*100*	+ **22**	*30*	+ **4**	*6*	+ **6,5**	*9*	+ **0,8**		+ **41**	*56*	+ **4**	*6*
100 *e/m*		36		100		89		28				30			
*Bicalcique***	7,95														
ΔP minéral (*m*)*		+ 195	*100*	+ 35	*18*	+ 6	*3*	+ 17	*9*	+ 0,5		+ 126	*63*	+ 6	*3*
ΔP labile (*e*)		+ **102**	*100*	+ **36**	*35*	+ **5,5**	*5*	+ **8,5**	*8*	+ **0,7**		+ **43**	*42*	+ **6**	*6*
100 *e/m*		52		103		90		50				34			
*Scories***	8,0														
ΔP minéral (*m*)*		+ 205	*100*	+ 18	*9*	+ 5,5	*3*	+ 7	*3,5*	+ 0,5		+ 157	*78*	+ 7	*3*
ΔP labile (*e*)		+ **48**	*100*	+ **20**	*42*	+ **3**	*6*	+ **3**	*6*	+ **1**		+ **16**	*33*	+ **3**	*6*
100 *e/m*		23		110		55		43				10			
*Phosphate naturel***	8,05														
ΔP minéral (*m*)*		+ 185	*100*	+ 3	*1,5*	0		+ 2	*1*	+ 0,5		+ 160	*87*	+ 15	*8*
ΔP labile (*e*)		+ **9**	*100*	+ **4**	*45*	+ **0,5**		+ **1**		+ **0,7**		+ **3**	*33*	+ **1**	
100 *e/m*		5						50				2			
*Phospal***	8,0														
ΔP minéral (*m*)*		+ 200	*100*	+ 24	*12*	+ 4,5	*2*	+ 21	*10,5*	— 1,5		+ 156	*78*	— 2	
ΔP labile (*e*)		+ **70**	*100*	+ **26**	*37*	+ **4**	*6*	+ **9,5**	*13*	— **1,0**		+ **28**	*40*	+ **2**	
100 *e/m*		35		108		89		45				18			
*Liquide 14-48***	7,9														
ΔP minéral (*m*)*		+ 210	*100*	+ 32	*15*	+ 6	*3*	+ 18	*8,5*	— 0,5		+ 146	*70*	+ 5	*2*
ΔP labile (*e*)		+ **76**	*100*	+ **32**	*42*	+ **5**	*7*	+ **8,5**	*11*	**0**		+ **33**	*43*	+ **5**	*3*
100 *e/m*		36		100		83		47				23			

*, **, cf. tableau 1.

TABLEAU 3. — *Sol andique d'Orcival*
(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe) insoluble		P-NaOH (P-Fe) soluble		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8		9	
Témoin	5,4																
P minéral (*m*)*		2 330	*100*	2	*0,1*	1	*tr*	370	*16*	54	*2,3*	235	*10*	760	*33*	610	*25*
P labile (*e*)		**122**	*100*	**1,6**	*1,3*	**0,6**	*0,5*	**79**	*65*	**2,2**	*1,8*	**27**	*22*	**10**	*8*	**8**	*6,5*
100 *e*/*m*		5,2		80				21		4		11,5		1,3		1,3	
*Superphosphate***	5,45																
ΔP minéral (*m*)*		+ 390	*100*	+ 2		+ 0,5		+ 235	*60*	— 3		+ 90	*23*	+ 65	*17*	+ 15	*4*
ΔP labile (*e*)		+ **194**	*100*	+ **2,4**		**0**		+ **124**	*64*	+ **0,8**		+ **39**	*20*	+ **12**	*6*	+ **4**	
100 *e*/*m*		50						53				43		18			
*Bicalcique***	5,5																
ΔP minéral (*m*)*		+ 395	*100*	+ 2		0		+ 225	*57*	— 2		+ 70	*18*	+ 100	*25*	— 10	
ΔP labile (*e*)		+ **146**	*100*	+ **2**		**0**		+ **94**	*64*	+ **0,4**		+ **27**	*18*	+ **8**	*5,5*	+ **3**	
100 *e*/*m*		37						42				39		8			
*Scories***	5,9																
ΔP minéral (*m*)*		+ 430	*100*	+ 1		0		+ 215	*50*	+ 2		+ 75	*17*	+ 95	*22*	+ 40	*9*
ΔP labile (*e*)		+ **139**	*100*	+ **1**		**0**		+ **83**	*60*	+ **1**		+ **26**	*19*	+ **9**	*6*	+ **4**	
100 *e*/*m*		32						39				35		10			
*Phosphate naturel***	5,5																
ΔP minéral (*m*)*		+ 405	*100*	+ 1		0		+ 140	*35*	— 2		+ 50	*12*	+ 110	*37*	+ 75	*18*
ΔP labile (*e*)		+ **116**	*100*	+ **1,5**		**0**		+ **56**	*48*	— **0,4**		+ **35**	*30*	+ **5**	*4*	**0**	
100 *e*/*m*		29						40				70		5			
*Phospal***	5,4																
ΔP minéral (*m*)*		+ 410	*100*	+ 1		0		+ 145	*35*	— 1		+ 85	*21*	+ 90	*22*	+ 95	*23*
ΔP labile (*e*)		+ **82**	*100*	+ **1**		**0**		+ **47**	*57*	+ **0,7**		+ **16**	*20*	+ **6**	*7*	+ **4**	
100 *e*/*m*		20						32				19		7			
*Liquide 14-48****	5,3																
ΔP minéral (*m*)*		+ 505	*100*	+ 2		+ 0,5		+ 285	*57*	+ 2		+ 95	*19*	+ 105	*21*	+ 10	*2*
ΔP labile (*e*)		+ **212**	*100*	+ **2**		**0**		+ **142**	*67*	+ **0,8**		+ **38**	*18*	+ **11**	*5*	+ **5**	
100 *e*/*m*		42						50				40		10			

* Dans les colonnes 2, 6 et 9, il s'agit de phosphore total, incluant P organique
** Écarts par comparaison au témoin.
*** Dose appliquée = 485 p.p.m. au lieu de 400 p.p.m.

b) *Phosphore labile.*

Dans ce sol acide très riche en hydroxydes de fer et d'aluminium on constate qu'après 3 ans de contact, le superphosphate est l'engrais qui présente le meilleur degré de labilité (50 p. 100) et le phospal le moins bon (20 p. 100), les autres engrais se classant comme suit en ordre décroissant : liquide 14-48, bicalcique, scories, phosphate naturel, seules les 2 formes extrêmes de la série étant significativement différentes à P = 0,05.

c) *Fractionnement du phosphore.*

Les ions phosphoriques sont soumis dans ce sol à de très fortes énergies d'adsorption qui expliquent l'absence quasi totale de phosphore extractible à l'eau et à NH_4Cl malgré le doublement de la dose appliquée par rapport aux deux sols précédemment étudiés. Conformément aux observations effectuées en sols acides par les auteurs consultés, *le phosphore introduit est retrouvé en majeure partie dans P-Al, secondairement dans P-Fe et P-Ca.* L'influence de la forme chimique y est manifeste puisque les engrais les moins solubles, c'est-à-dire le phosphate naturel, le phospal, et à un degré moindre les scories, laissent dans ce sol un résidu non attaqué par les divers réactifs mis en œuvre et compensé par un moindre enrichissement de P-Al.

Cette constatation est surprenante parce qu'elle concerne les engrais les moins susceptibles d'enrichir la solution du sol. La précipitation de phosphates dans la solution du sol paraît donc exclue. De même, il semble peu vraisemblable que ce phosphore résiduel soit la conséquence de particules d'engrais demeurées intactes (vieillissement nul), car, dans ce cas, le résidu phosphaté serait de l'ordre de 10 p. 100 seulement avec le phospal et le phosphate naturel utilisé (cf. tabl. 4). Nous pensons

TABLEAU 4

Fractionnement du phosphore dans les engrais solides étudiés
(p. 100 du P. total)

Engrais	P total	P-NH_4Cl	P-NH_4F (P-Al)	P-NaOH (P-Fe)	P-H_2SO_4 (P-Ca)	P résiduel
Superphosphate ...	100	86	7	tr	7	tr
Bicalcique	100	2,5	57	0,3	36	3,6
Scories	100	0,2	3	tr	74	23
Phosphate naturel .	100	tr	3	tr	88	9
Phospal	100	tr	19	19	51	11

plutôt qu'il résulte d'un phénomène d' « occlusion » consécutif à la formation de revêtements d'hydroxydes de fer à la surface des particules d'engrais avant leur dissolution complète (CHANG et JACKSON, 1957). Ce phénomène provoquerait ainsi progressivement une véritable séquestration du phosphore des engrais, apparemment irréversible, tout au moins en absence de racines.

La distribution des ions retrouvés à l'état labile après vieillissement montre que

TABLEAU 5. — *Sol brun acide de Saint-Amant-Roche-Savine*
(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe) insoluble		P-NaOH (P-Fe) soluble		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8		9	
Témoin	6,4																
P minéral (*m*)*		1 095	*100*	36	*3,3*	3,5	*0,3*	145	*13*	16	*1,5*	186	*17*	141	*13*	403	*37*
P labile (*e*)		**160**	*100*	**32**	*20*	**3,1**	*2*	**80**	*50*	**0,8**	*0,5*	**39**	*24,5*	**2,5**	*1,6*	**2**	*1,2*
100 *e*/*m*		14,6		89		88		55		5		21		1,8		0,5	
*Superphosphate***	6,4																
Δ P minéral (*m*)		+ 200	*100*	+ 37	*19*	+ 2		+ 107	*53*	+ 3		+ 41	*21*	+ 3		+ 5	*3*
Δ P labile (*e*)		+ **90**	*100*	+ **37**	*41*	+ **2**		+ **44**	*49*	**0**		**11**	*12*	+ **0,8**		**tr**	
100 *e*/*m*		45		100				41				27					
*Bicalcique***	6,5																
Δ P minéral (*m*)*		+ 165	*100*	+ 50	*30*	+ 3,5		+ 74	*45*	0		+ 34	*21*	— 1		+ 5	*3*
Δ P labile (*e*)		+ **102**	*100*	+ **52**	*51*	+ **3,7**		+ **31**	*30*	**0**		+ **11**	*11*	+ **0,4**		+ **0,5**	
100 *e*/*m*		62		104				42				31					
*Scories***	7,0																
Δ P minéral (*m*)*		+ 175	*100*	+ 50	*29*	+ 7		+ 59	*34*	— 3		+ 21	*12*	+ 28	*16*	+ 20	*11*
Δ P labile (*e*)		+ **102**	*100*	+ **53**	*52*	+ **6**		+ **30**	*29*	0		+ **14**	*14*	+ **0,8**		+ **0,8**	
100 *e*/*m*		58		106				51				67					
*Phosphate naturel***	6,5																
Δ P minéral (*m*)*		+ 200	*100*	+ 1		— 0,5		+ 3		— 2		+ 2	*1*	+ 190	*95*	+ 15	*8*
Δ P labile (*e*)		+ **10**	*100*	+ **1**		**0**		+ **2**		+ **0,5**		+ **2**		+ **2,5**		+ **0,7**	
100 *e*/*m*		5															
*Phospal***	6,2																
Δ P minéral (*m*)*		+ 210	*100*	+ 12	*6*	+ 0,5		+ 91	*43*	— 2		+ 36	*17*	+ 38	*18*	+ 28	*13*
Δ P labile (*e*)		**23**	*100*	+ **13**	*56*	**0**		+ **8**	*35*	**0**		— **1**		+ **1,8**		+ **0,4**	
100 *e*/*m*		11		108				9									
*Liquide 14-48***	6,4																
Δ P minéral (*m*)*		+ 155	*100*	+ 31	*20*	+ 1,5		+ 57	*37*	— 2		+ 33	*21*	+ 25	*16*	+ 13	*8*
Δ P labile (*e*)		+ **72**	*100*	+ **32**	*45*	+ **1**		+ **27**	*38*	**0**		+ **7**	*10*	+ **1,7**		+ **0.8**	
100 *e*/*m*		46		103				43				21					

*, **, cf. tableau 3.

leur plus grande part (48 à 67 p. 100) *est comprise dans P-Al,* que 20 p. 100 environ appartiennent à P-Fe, mais que la fraction P-Ca est peu enrichie (4 à 7 p. 100). Elle confirme l'intérêt à accorder aux fractions P-Al et P-Fe pour assurer l'alimentation phosphatée des cultures réalisées dans un tel sol.

4. — *Sol brun acide faiblement lessivé de Saint-Amant-Roche-Savine* (n° 1) (tabl. 5)

a) *Bilan du phosphore.*

Des écarts relativement importants apparaissent ici dans le bilan du phosphore puisque, sur trois traitements, on ne retrouve pas la totalité du phosphore introduit. Il nous semblent liés davantage à un défaut de représentativité des échantillons prélevés qu'à des pertes éventuelles par drainage peu compatibles avec le mode de conduite de l'expérience et la nature chimique des engrais concernés. Pour ces raisons, les indices relatifs sont plus intéressants à considérer que les écarts absolus.

b) *Phosphore labile.*

Les phosphates appliqués ont provoqué, là encore, des enrichissements en ions labiles fort variables. Ainsi, le superphosphate, le bicalcique, les scories et le liquide 14-48 ont conservé des taux de lalibité relativement élevés puisque compris entre 45 et 62 p. 100, non significativement différents entre eux. Par contre, le phospal et le phosphate naturel n'ont que très faiblement alimenté le pool labile, prouvant ainsi une solubilisation faible ou négligeable dans un tel environnement chimique.

c) *Fractionnement du phosphore.*

Dans ce sol bien pourvu à l'origine en phosphore assimilable et caractérisé, contrairement à l'exemple précédent, par une acidité modérée et surtout par un faible pouvoir fixateur, l'enrichissement se répercute différemment dès la première fraction séparée : « P-soluble eau » et confirme le comportement singulier du phospal et plus encore du phosphate naturel. Sauf pour ce dernier engrais, *c'est la fraction P-Al qui bénéficie le plus du phosphore introduit.*

Par contre, la distribution des ions labiles est relativement homogène quel que soit l'engrais. *La fraction extraite à l'eau en contient approximativement la moitié et la fraction soluble dans NH_4F la plus grande partie du complément.*

B. — Expériences au champ

Comparativement aux essais en pots dont il vient d'être question, il faut s'attendre à trouver des fluctuations nettement plus importantes dans les bilans du phosphore établis à partir d'expériences culturales. Tout apport d'engrais phosphaté en couverture, aussi bien réparti soit-il et quel que soit le soin donné aux labours et autres façons culturales, aboutit inévitablement à une localisation de l'engrais dans la masse du sol et crée, par conséquent, un milieu nutritif hétérogène.

1. — *Sol brun acide fortement lessivé de Saint-Amant-Roche-Savine* (n° 2) (tabl. 6)

Cette expérience s'est déroulée de 1956 à 1967 inclus, sur deux rotations quadriennales successives comprenant : Pommes de terre — Blé d'hiver — Trèfle violet — Blé d'hiver suivies de deux rotations biennales de pommes de terre et blé d'hiver.

Quatre engrais phosphatés ont été comparés à un témoin sans engrais. Ce sont :

— le superphosphate simple (à 16 p. 100 de P_2O_5) ;
— les scories de déphosphoration (à 16 ou 18 p. 100 de P_2O_5) ;
— le phosphate naturel (à 30 p. 100 de P_2O_5) ;
— le phospal (à 35 p. 100 de P_2O_5).

Sur la totalité de sa surface, le champ d'essai a bénéficié des mêmes fumures azotées et potassiques, de fumures organiques relativement importantes (40 t/ha de fumier sur la pomme de terre) et enfin d'un amendement calcaire (3 000 kg/ha de CaO en 1961).

Les engrais phosphatés ont été appliqués à des doses identiques de P_2O_5 de la manière suivante :

— de l'automne 1955 à l'automne 1959, 840 kg de P_2O_5 par ha, soit une dose moyenne annuelle de 168 kg/ha (= dose 1) très largement supérieure aux exportations ($\simeq$ 40 kg/ha et par an).

— en raison de l'inefficacité de ces fumures d'enrichissement sur les récoltes alors que l'analyse du sol (1) révélait des disponibilités phosphatées considérées à cette époque comme médiocres, un apport massif de 2 700 kg de P_2O_5 par ha (= dose 2) a été réalisé en octobre 1962 sur la moitié de la surface de toutes les parcelles (sous forme superphosphate sur les témoins).

Les arrière-effets de ces diverses fumures phosphatées ont été contrôlés sur les récoltes jusqu'en 1967. Les échantillons de sols analysés dans cette étude ont été prélevés en mars 1968 sur la profondeur de la couche labourée (0-25 cm). Ils sont issus du mélange de 5 prises par parcelle sur les 4 répétitions du champ d'essai.

a) *Bilan du phosphore.*

Compte tenu des exportations par les récoltes et des importations par les fumures organiques et minérales, les bilans moyens du phosphore s'établissent ainsi *dans la seule couche labourée* :

Traitements						
Témoin	— 86 kg de P_2O_5	soit environ	— 10 p.p.m. de P (2)			
Doses 1	+ 720	—	en moyenne	+ 100	—	de P
Doses 2	+ 2 570	—		+ 350	—	
Doses 1 + 2	+ 3 400	—	en moyenne	+ 460	—	

Les résultats analytiques (tabl. 6) montrent que les variations du phosphore total sont proches de ces bilans à l'exception du traitement ayant reçu la fumure renforcée (dose 1 + 2) à base de superphosphate.

(1) Cf. GACHON (1972).
(2) Correspondances établies sur la base de 3 250 t de terre par ha.

TABLEAU 6

Expérience de Saint-Amant-Roche-Savine

(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe) insoluble		P-NaOH (P-Fe) soluble		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8		9	
Témoin	5,3																
P minéral (*m*)*		920	*100*	11	*1,2*	0,5	*tr*	89	*9,7*	16	*1,7*	138	*15*	106	*11,5*	408	*44*
P labile (*e*)		**92**	*100*	**10,6**	*12*	**0,6**	*0,7*	**39**	*42*	**1**	*1,1*	**25**	*27*	**2,2**	*2,4*	**3**	*3,1*
100 *e*/*m*		10		96				44		7		18		2		0,8	
*Superphosphate***																	
(dose 1)	5,6																
ΔP minéral (*m*)*		+ 110	*100*	+ 11	*10*	+ 1		+ 36	*33*	+ 0,5		+ 24	*22*	+ 14	*13*	+ 22	*20*
ΔP labile (*e*)		+ **43**	*100*	+ **9**	*21*	+ **0,5**		+ **25**	*58*	**tr**		+ **10**	*23*	+ **1**		+ **0**	
100 *e*/*m*		39		82				70				42					
(dose 2)	5,5																
ΔP minéral (*m*)*		+ 360	*100*	+ 43	*12*	+ 2		+ 180	*50*	+ 0,5		+ 64	*18*	+ 27	*8*	+ 28	*8*
ΔP labile (*e*)		+ **134**	*100*	+ **35**	*26*	+ **2**		+ **80**	*60*	— **0,5**		+ **17**	*13*	+ **0,5**		+ **0**	
100 *e*/*m*		37		81				45				27					
(dose 1 + 2)	5,4																
ΔP minéral (*m*)*		+ 380	*100*	+ 44	*12*	+ 3		+ 200	*53*	— 1		+ 58	*15*	+ 41	*11*	+ 34	*9*
ΔP labile (*e*)		+ **144**	*100*	+ **40**	*28*	+ **3**		+ **86**	*60*	**0**		+ **14**	*10*	+ **0,5**		+ **0**	
100 *e*/*m*		38		91				43				24					
*Scories***																	
(dose 1)	5,8																
ΔP minéral (*m*)*		+ 130	*100*	+ 11	*8*	+ 0,5		+ 34	*26*	+ 1		+ 20	*15*	+ 33	*25*	+ 20	*15*
ΔP labile (*e*)		+ **31**	*100*	+ **8**	*26*	+ **0,5**		+ **19**	*61*	**0**		+ **4**	*13*	**0**		+ **0,5**	
100 *e*/*m*		24		73				56				20					
(dose 1 + 2)	6,6																
ΔP minéral (*m*)*		+ 450	*100*	+ 71	*16*	+ 12		+ 187	*42*	+ 1		+ 65	*14*	+ 82	*18*	+ 32	*7*
ΔP labile (*e*)		+ **206**	*100*	+ **69**	*34*	+ **11**		+ **107**	*52*	+ **0,5**		+ **15**	*7*	+ **2**		+ **2**	
100 *e*/*m*		45		97				57				23					

TABLEAU 6 *(suite)*

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl	P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH (P-Fe)		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
									insoluble	soluble				
	1	2		3		4	5		6	7	8		9	
*Phosphate naturel***														
(dose 1)	5,7													
ΔP minéral (*m*)*		+ 150	*100*	+ 7	*5*	+ 0,5	+ 13	*9*	— 2	+ 23 *15*	+ 68	*45*	+ 16	*11*
ΔP labile (*e*)		+ **36**	*100*	+ **7**	*20*	**0**	+ **16**	*45*	**0**	+ **8** *22*	+ **1**		**0**	
100 *e/m*		24		100			123			35				
(dose 1 + 2)	5,7													
ΔP minéral (*m*)*		+ 460	*100*	+ 21	*5*	+ 3,5	+ 53	*12*	— 3	+ 32 *7*	+ 316	*69*	+ 43	*9*
ΔP labile (*e*)		+ **95**	*100*	+ **20**	*21*	+ **3,5**	+ **53**	*56*	**0**	+ **10** *11*	+ **5**		+ **1,5**	
100 *e/m*		21		95			100			31				
*Phospal***														
(dose 1)	5,7													
ΔP minéral (*m*)*.....		+ 100	*100*	+ 5	*5*	+ 0,5	+ 33	*33*	— 2	+ 25 *25*	+ 22	*22*	+ 12	*12*
ΔP labile (*e*)		+ **26**	*100*	+ **3**	*13*	+ **0,5**	+ **18**	*78*	**0**	+ **5** *22*	+ **0,5**		**0**	
100 *e/m*		26		60			55			20				
(dose 1 + 2)	5,5													
ΔP minéral (*m*)*.....		+ 480	*100*	+ 24	*5*	+ 1	+ 245	*51*	+ 1	+ 80 *17*	+ 94	*20*	+ 38	*8*
ΔP labile (*e*)		+ **87**	*100*	+ **24**	*29*	+ **1**	+ **62**	*74*	**0**	+ **2** *2*	**0**		**0**	
100 *e/m*		18		100			25			2				

*, **, cf. tableau 3.

b) *Fractionnement du phosphore.*

Les analyses mettent aussi en évidence que le phosphore du témoin de référence est réparti en quantités comparables entre P-Al, P-Fe et P-Ca, mais en présence d'une charge résiduelle importante.

Le vieillissement n'est cependant pas parvenu à effacer totalement l'empreinte originelle des formes d'engrais puisque l'enrichissement n'est pas comparable dans chacune des fractions séparées. C'est ainsi que les traitements au phosphate naturel sont caractérisés par l'augmentation singulière de P-Ca compensée par une moindre participation de la fraction P-Al ; alors que les traitements ayant reçu du superphosphate montrent la tendance inverse, confirmant les observations antérieures, en particulier celles de MANNING et SALOMON (1965).

La dose d'application semble modifier également la distribution du phosphore puisqu'on observe une tendance vers une plus grande proportion de P-Al et une plus faible fraction résiduelle en présence des doses massives.

Dans la mesure où il est admis que le vieillissement se traduit par un déplacement du phosphore des formes les plus labiles (extraits « eau », « NH_4Cl », « NH_4F ») vers des combinaisons moléculaires de plus en plus stables, liées selon les sols au calcium, au fer et à l'aluminium, la moins grande charge relative de P résiduel marquerait une moindre évolution des doses massives. Mais, sans doute, cette observation est-elle simplement le reflet de la durée de contact entre le sol et l'engrais puisque les très fortes doses (doses 2) ont été appliquées 5 ans seulement avant le prélèvement des échantillons contre une durée double en moyenne pour les doses moins élevées (doses 1).

c) *Phosphore labile.*

La considération du phosphore labile est plus instructive. Tout d'abord, contrairement à une opinion souvent émise, on constate que *le degré moyen de labilité du phosphore introduit ne varie pas sous l'effet de la dose,* à l'exception des scories à la dose 1 + 2 qui, vraisemblablement parce qu'elles ont augmenté nettement le pH, ont accru la quantité de phosphore autodiffusible, confirmant ainsi les observations de BARBIER *et al.* (1965).

D'autre part, à pH relativement constant, l'engrais phosphaté le plus fortement soluble des formes comparées, le superphosphate, présente le taux de labilité le plus élevé tendant ainsi à montrer que ce caractère est susceptible de conférer à une telle forme une supériorité durable tout au moins dans le domaine de la mobilité des ions phosphoriques incorporés.

Enfin, *le fractionnement selon C. et J. des ions phosphoriques labiles retrouvés est à peu près indépendant des formes. Il est caractérisé par la prédominance de la fraction P-Al,* la fraction « soluble-eau » et parfois, la fraction P-Fe pour les doses faibles, étant ensuite les mieux représentées.

Ces constatations confirment donc, en général, celles observées dans le sol précédent de Saint-Amant-R.-S. (n° 1). Toutefois, on remarquera ici le meilleur comportement relatif du phospal et surtout du phosphate naturel, qu'il faut vraisemblablement attribuer en premier lieu à la plus forte acidité du sol.

2. — *Sol brun calcaire de Crouelle*

Les échantillons analysés ont été prélevés au printemps 1968 dans les parcelles d'une expérience ayant commencé à l'automne 1949, soit depuis 19 ans, et comparant 2 niveaux de fumure phosphatée associés à diverses combinaisons d'engrais minéraux ou organiques. Il s'agit d'échantillons moyens constitués à partir de 5 prélèvements parcellaires effectués sur les 6 répétitions de l'essai.

La rotation a été généralement triennale, de type maïs — blé — orge.

L'étude de la vitesse d'épuisement des abondantes réserves phosphatées et potassiques de ce sol constituant l'un des objectifs de l'essai, les résidus de récolte ont été systématiquement exportés du champ d'expérience. L'action combinée du phosphore et du potassium est appréciée en absence ou en présence de fumier de ferme, c'est-à-dire par la comparaison des 4 traitements suivants :

— apport exclusif d'azote minéral = traitement N (servant de référence)
— fumure minérale complète = traitement NPK
— fumure organique associée à N minéral = traitement NF
— fumure organique + fumure minérale complète = traitement NPKF avec N constant pour tous les traitements.

Les fumures phosphatées ont été apportées chaque année sous forme de superphosphate ou de scories en alternance.

a) *Bilan du phosphore.*

Compte tenu des importations par les fumures organiques et/ou minérales et des exportations par les parties aériennes, les bilans du phosphore s'établissent ainsi après 19 années d'expérience :

Traitement		kg de P_2O_5 par ha
N.....	— 937	
NPK ..	+ 862	—
NF	— 33	—
NPKF .	+ 1 102	—

En rapportant ces données exclusivement à la couche labourée (5 000 t de terre/ha) on obtient :

Traitement		p.p.m. de P
N	— 82	
NPK ...	+ 75	—
NF.....	— 3	—
NFKF ..	+ 96	—

Les résultats analytiques, consignés au tableau 7, font ressortir un profond désaccord puisque les variations du phosphore total des échantillons analysés présentent une amplitude près de deux fois plus faible en moyenne que celle des données fournies par les chiffres ci-dessus.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats apparemment contradictoires. Parmi les processus provoquant une homogénéisation du phosphore dans le sens vertical, on peut souligner le puissant développement racinaire en profondeur observé dans ce champ d'essai, lié à la présence d'une nappe phréatique oscillant entre 0,90 et 1,30 m au cours de l'année, conjuguée à une excellente perméabilité.

TABLEAU 7

Expérience de Crouelle

(Résultats en p.p.m. de P)

Traitements	pH	P total		P-eau		P-NH_4Cl		P-NH_4F (P-Al)		P-NaOH(P-Fe) insoluble		P-NaOH(P-Fe) soluble		P-H_2SO_4 (P-Ca)		P résiduel	
	1	2		3		4		5		6		7		8		9	
N	8,05	1 800	*100*	10	*0,5*	3	*0,2*	42	*2,3*	5	*0,3*	5	*0,3*	990	*55*	700	*39*
P minéral (*m*)* ...		**79**	*100*	**7,6**	*9,6*	**1,9**	*2,4*	**10,4**	*13,2*	**0,7**	*0,9*	**3,7**	*5,7*	**43**	*55*	**12**	*15*
P labile (*e*)		4,4		76		64		25		14		74		4,3		1,7	
100 *e/m*																	
*NPK***	8,1																
ΔP minéral (*m*)* ...		+ 90	*100*	+ 8	*9*	+ 2		+ 6	*7*	+ 1		+ 2		+ 50	*55*	+ 20	*22*
ΔP labile (*e*)		+ **34**	*100*	+ **11**	*32*	+ 2		+ **3,5**	*10*	+ **0,7**		+ **0,5**		+ **14**	*41*	+ **3**	
100 *e/m*		38															
*NF***	8,1																
ΔP minéral (*m*)* ...		+ 35	*100*	+ 3	*9*	+ 0,5		+ 9	*26*	+ 1		+ 2		+ 12	*34*	+ 6	*17*
ΔP labile (*e*)		+ **8**	*100*	+ **4**	*50*	+ **0,6**		+ **1**	*12*	+ **0,9**		+ **0,3**		— **1**		+ **0**	
100 *e/m*		23															
*NPKF***	8,1																
ΔP minéral (*m*)* ...		+ 110	*100*	+ 8	*7*	+ 2		+ 16	*15*	+ 1		+ 1		+ 53	*48*	+ 28	*25*
ΔP labile (*e*)		+ **29**	*100*	+ **6**	*20*	+ **2**		+ **5**	*17*	+ **1,2**		+ **0,5**		+ **12**	*41*	+ **2**	
100 *e/m*		26															

*, **, cf. tableau 3.

Les racines sont alors capables de transférer en profondeur des quantités probablement assez importantes de phosphates prélevés en surface. De même, les fentes de retrait du sol, fréquentes en été, constituent des voies d'entraînement de particules terreuses de la surface vers la profondeur. Enfin, les vers de terre contribuent aussi au brassage des divers horizons du sol.

L'homogénéisation peut être également réalisée dans le sens horizontal, soit par érosion éolienne, fréquente en Limagne comme nous l'avons montré (GACHON, 1963), soit par les outils de préparation du sol qui peuvent avoir un effet relatif non négligeable en raison de la faible dimension des parcelles et de la forte adhérence de ce sol argileux aux roues et pièces travaillantes du matériel agricole.

Quoi qu'il en soit, des études complémentaires sont nécessaires pour établir la part qui revient à chacune de ces hypothèses.

b) *Fractionnement du P.*

Le fractionnement pratiqué selon C. et J. montre que ce sol formé aux dépens de colluvions marnocalcaires amendées par des sables volcaniques ne cède guère de phosphore que sous l'action du réactif sulfurique.

Une première hypothèse est de rapporter l'appauvrissement des extraits « eau », « NH_4Cl », « NH_4F » et « NaOH » à l'épuisement relativement important auquel a été soumis le traitement N qui sert de référence (déficit moyen annuel de 50 kg de P_2O_5 par ha). Elle s'avère inacceptable quand on constate que les apports largement excédentaires du traitement NPK se retrouvent pour plus des trois quarts dans P-Ca et P résiduel. A propos de ce dernier point, rappelons que la forte proportion — 17 à 25 p. 100 — du phosphore des engrais retrouvée dans la fraction résiduelle paraît due, pour une bonne part, à l'action incomplète de H_2SO_4 par suite de l'élévation du rapport sol/réactif (GACHON, 1972).

c) *Phosphore labile.*

Le degré de labilité du phosphore importé par les fumures est relativement faible surtout en présence de retours exclusivement organiques (traitement NF). Si, dans le cas des fumures minérales, on est en présence d'une perte véritable de labilité consécutive au vieillissement des engrais, il en est autrement en présence de composés organiques qui doivent au préalable être minéralisés pour fournir des ions labiles et devenir susceptibles de subir une évolution chimique vers des phosphates minéraux de plus en plus calciques.

Compte tenu de la précision des mesures et de la faible amplitude des écarts enregistrés, les différences de répartition du phosphore labile ne sont pas significatives entre traitements. Il y a lieu cependant de souligner la tendance que marquent les fumures à accroître préférentiellement la quantité des ions les plus facilement accessibles (ici, P-Al et surtout P-eau).

Ces résultats issus d'une expérience culturale conduite depuis près de 20 ans avec des fumures phosphatées cependant assez différenciées dans leurs doses confirment la nécessité de recourir à des essais permanents de très longue durée ou à des travaux menés *in vitro* et en présence de doses élevées pour obtenir des données suffisamment solides dans ce domaine difficile de l'étude du vieillissement des engrais phosphatés en sols carbonatés.

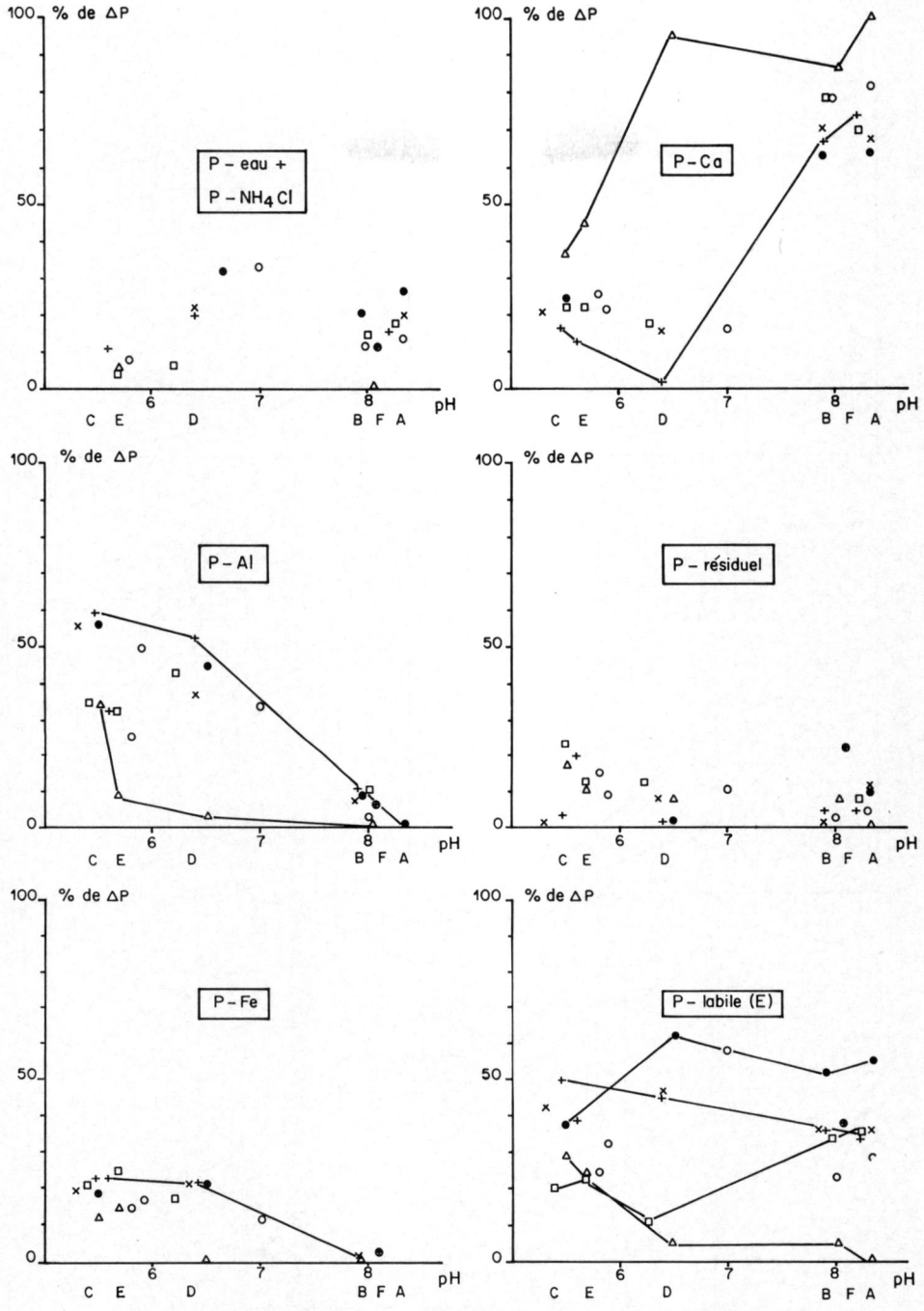


FIG. 1. — *Distribution du phosphore des engrais en fonction du pH du sol*

+ super
● bicalcique
○ scories
△ phosphate naturel
□ phospal
× liquide

A : Saint-Yvoine
B : Aigueperse
C : Orcival
D : Saint-Amant (1)
E : Saint-Amant (2)
F : Crouelle

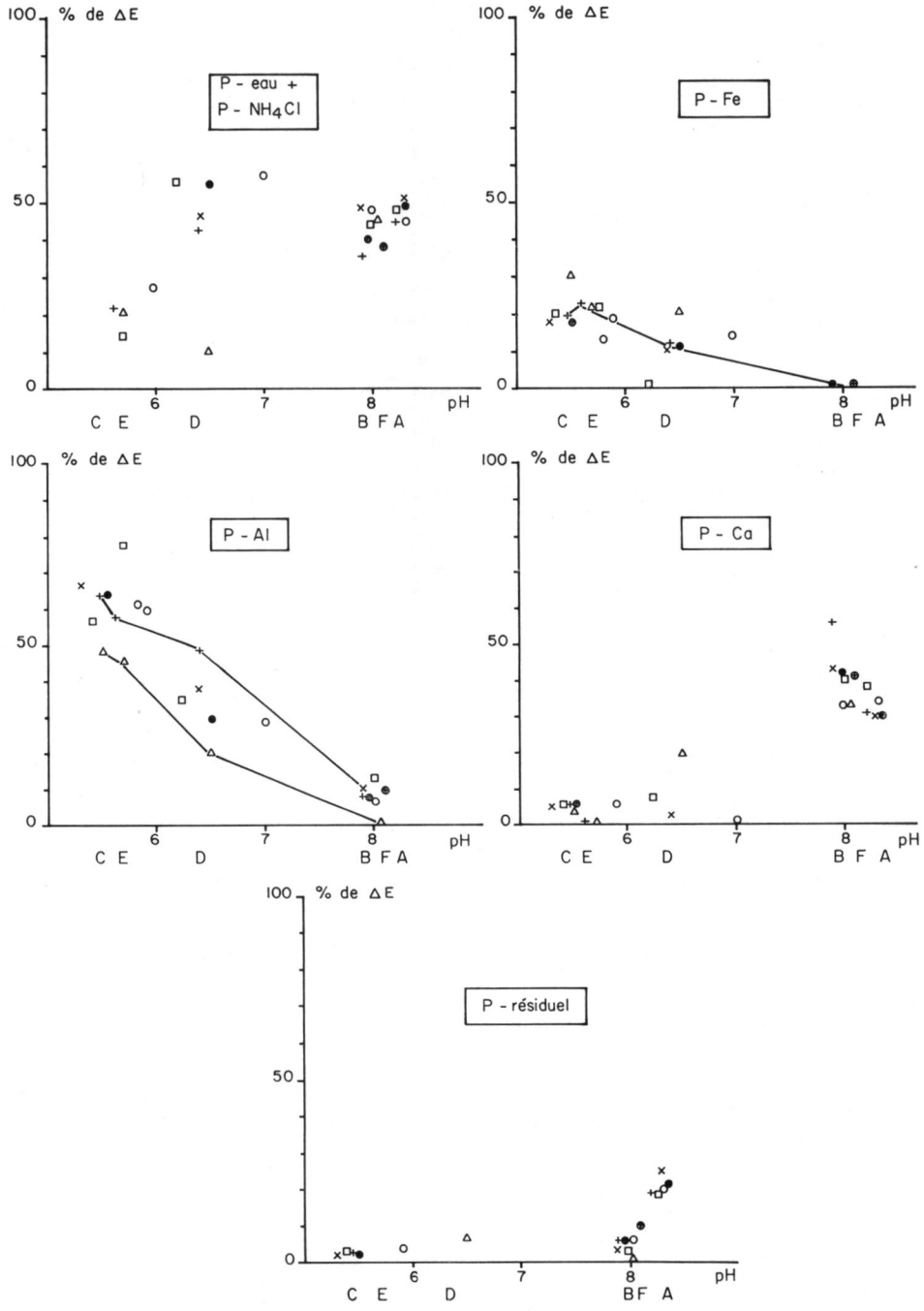


FIG. 2. — *Distribution du phosphore labile en fonction du pH du sol*
(Symboles, cf. fig. 1)

IV. — DISCUSSION

Considérés dans leur ensemble, les résultats de cette étude permettent de dégager quelques remarques générales sur les relations entre la nature chimique des engrais phosphatés et l'environnement dans lequel ils sont placés.

A. — *L'influence du pH du sol*

Dans une étude antérieure (GACHON, 1972), nous avons vu que la distribution du phosphore au sein des fractions séparées selon la méthode de C. et J. est, avant tout, le reflet des propriétés chimiques du sol.

En présence d'apports de phosphates en quantités relativement importantes, le sol conserve son rôle prédominant, principalement à travers son pH. C'est ce que montrent les figures 1 et 2 où sont représentées les distributions relatives du phosphore minéral et du phosphore labile attribués aux engrais au sein des différentes fractions séparées.

Ainsi, en sols acides, l'enrichissement en phosphore minéral comme en phosphore labile se manifeste surtout au niveau de la fraction P-Al. Il s'effectue vraisemblablement soit par « chemisorption » sur les oxydes amorphes et les argiles qui sont les composants du sol les plus aptes à fournir des sites d'adsorption pour les ions phosphoriques (MACHOLD, 1963 ; HARTER, 1969), soit encore par la formation de précipités de phosphates de fer et d'aluminium au sein desquels le phosphore a perdu — peut-être provisoirement — son caractère labile.

Dans les sols de pH alcalin, riches en ions Ca^{2+}, l'enrichissement dû aux engrais phosphatés marque au contraire principalement la fraction P-Ca. Mais le phosphore retrouvé dans ces conditions présente un moindre degré de labilité qui traduit les difficultés qu'éprouvent les ions phosphoriques à demeurer diffusibles.

Dans cette fraction P-Ca plus que dans toute autre, l'interprétation des résultats fournis par la méthode C. et J. à des sols régulièrement fertilisés soulève le dilemme d'apprécier si l'enrichissement observé est le fait d'un vieillissement tel que nous l'avons défini en préambule, c'est-à-dire d'une transformation chimique du fertilisant, ou s'il résulte, au contraire, du maintien des particules d'engrais dans leur forme chimique initiale. Le problème se pose particulièrement pour les engrais faiblement solubles dans l'eau et dans les réactifs alcalins qui sont les premiers extractifs mis en œuvre pour opérer le fractionnement. Parmi les engrais étudiés ici, tels sont les cas du phosphate naturel et des scories dont 3 à 4 p. 100 seulement du phosphore sont solubilisés par NH_4Cl-NH_4F et NaOH agissant successivement (cf. tabl. 4). La proportion d'ions labiles est néanmoins susceptible d'orienter l'interprétation.

B. — *L'influence de la forme chimique des engrais et les interactions sol × forme*

En examinant séparément le comportement de chacune des formes d'engrais phosphatés mises en comparaison, on peut dégager les conclusions suivantes :

a) *Superphosphate et engrais liquide 14-48.*

Capables d'élever beaucoup plus fortement — tout au moins dans un temps court — la concentration en phosphore de la solution du sol, *les engrais solubles dans l'eau réagissent le plus rapidement et le plus complètement avec le sol.* En conséquence, ils « vieillissent » nécessairement plus rapidement que les autres formes. Pour cette raison, ils représentent les meilleurs références pour suivre la cinétique du vieillissement. Dans nos différents essais, les deux formes solubles utilisées, *le superphosphate et l'engrais liquide 14-48 ont eu le même comportement apparent.*

Dans les 3 sols acides étudiés, on constate tout d'abord *qu'on retrouve sous forme labile 37 à 50 p. 100 du phosphore introduit sous ces formes.* Compte tenu des nombreuses mesures de phosphore labile (valeur L) que nous avons effectuées par ailleurs sur des cultures en pots et dont une partie a fait l'objet de publications (GACHON, 1966 ; GACHON et TRIBOÏ, 1970), cela représente *70 à 90 p. 100 de l'engrais qui demeure 3 ans après l'épandage, susceptible de participer réellement à la nutrition phosphatée.*

Cette masse correspond approximativement au phosphore minéral retrouvé dans les 4 premiers extraits. Elle paraît donc être constituée d'ions appartenant au pool autodiffusible (E) et d'autres ions non accessibles à l'échange isotopique tel qu'il a été réalisé *in vitro* mais susceptibles de devenir diffusibles en présence de racines, consécutivement à un effet complexe de la rhizosphère ou à un simple effet d'épuisement du pool par la plante. Toutefois, dans les sols les plus acides d'Orcival et de Saint-Amant (n° 2), la présence notable de phosphore dans l'extrait P-Ca traduirait un vieillissement plus avancé sous forme de phosphates de fer et/ou d'aluminium bien cristallisés et de ce fait incomplètement solubilisés par NH_4F et NaOH.

Dans les sols calcaires de Saint-Yvoine et d'Aigueperse, *le degré de labilité* du superphosphate et du liquide 14-48 retrouvés *est légèrement plus faible* qu'en sols acides : 34 à 37 p. 100 au lieu de 37 à 50 p. 100. Les ions introduits qui ont perdu leur labilité alimentent presque exclusivement la fraction P-Ca mais, là aussi, nous savons qu'une proportion importante d'entre eux — proche de la moitié — n'est pas définitivement hors de portée de la plante.

b) *Le phosphate bicalcique.*

Comparé à ces formes solubles, *le phosphate bicalcique précipité présente un comportement particulier dans les 2 sols calcaires et dans le sol brun faiblement acide de Saint-Amant* (n° 1). La différence, qui est significative, porte sur une moindre perte de labilité — 15 à 20 points en moyenne — dont le bénéfice apparaît dans la fraction P-eau pour la plus grande partie. *Il s'agit donc d'un vieillissement moins rapide* qui paraît surprenant quand on sait que le phosphate bicalcique constitue le premier stade intermédiaire de l'évolution que subit le superphosphate en milieu basique. Ce comportement particulier du phosphate bicalcique pourrait s'expliquer par sa plus faible solubilité relative dans l'eau qui réduirait sa réactivité avec $CaCO_3$ et les ions Ca^{2+} du sol (STRONG et RACZ, 1970) . Il n'est pas exclu non plus que la forme *anhydre* utilisée dans nos essais soit plus stable car s'hydrolysant moins rapidement que le phosphate bicalcique *dihydraté* formé par la réaction du monocalcique avec $CaCO_3$ (BELL et BLACK, 1970 *a* ; ARVIEU, 1972).

Ces résultats qui apportent une confirmation de la bonne efficacité relative du phosphate bicalcique souvent constatée en sols calcaires mériteraient d'être vérifiés

sur un plus grand nombre de sols neutres ou carbonatés. D'autant plus que le phosphate bicalcique *anhydre* est la forme sous laquelle se trouve le phosphore dans de nombreux engrais complexes solides.

c) *Le phospal.*

Dans les sols calcaires de Saint-Yvoine et d'Aigueperse, *cet engrais phosphaté se comporte apparemment comme le superphosphate* avec des taux globaux de labilité et une distribution des ions labiles approximativement les mêmes.

Par contre, *dans les 3 sols acides, le phospal présente un degré de labilité nettement plus faible* (11 à 23 p. 100). La valeur minimale observée dans le sol faiblement acide de Saint-Amant (n° 1) pourrait s'expliquer par la plus faible solubilité relative de cet engrais observé par BARBIER *et al* (1957) aux pH peu inférieurs à la neutralité.

d) *Les scories de déphosphoration.*

En ce qui concerne les *scories* (le traitement à la dose 1 de Saint-Amant mis à part car il paraît particulier), elles présentent un *comportement comparable à celui des formes les plus solubles dans les sols acides* où elles alimentent préférentiellement P-Al et, secondairement P-Fe. La légère surcharge observée dans P-Ca et P résiduel témoigne aussi d'une solubilisation incomplète, Il faut enfin souligner l'élévation de pH qu'elles provoquent.

La situation est différente *en sols calcaires* où *elles se remarquent principalement par leur plus faible aptitude à enrichir le pool d'ions labiles.* De ce fait, leur tendance à accroître le phosphore retrouvé dans P-Ca résulte vraisemblablement plus d'une solubilisation encore incomplète que d'un vieillissement plus rapide. Et, dans la mesure où ces phosphates demeurés à l'état brut sont susceptibles de passer ultérieurement sous forme labile, ce comportement serait avantageux pour entretenir à plus long terme la fertilité phosphorique du sol.

e) *Le phosphate naturel.*

Le phosphate naturel a été retrouvé dans sa quasi-totalité dans les fractions P-Ca et P résiduel des sols calcimagnésiques de Saint-Yvoine et d'Aigueperse et même du sol faiblement acide de Saint-Amant (n° 1). Ces constatations sont en accord avec les observations de nombreux auteurs dont KAILA (1963), MANNING et SALOMON (1965), LIBISELLER (1969). Les résultats du sol le plus riche de Saint-Amant (n° 2) montrent qu'il est encore peu transformé à pH 5,7, surtout à forte dose et cela, même en conditions favorables à son utilisation, c'est-à-dire en présence de cultures et d'apports abondants de fumier assurant une bonne activité biologique et réalisant à eux seuls la compensation presque complète des exportations culturales. La mesure et la distribution du phosphore labile confirment cette interprétation.

Il est ainsi vérifié que *cet engrais demeure inerte en milieu faiblement acide, neutre ou basique* où sa solubilisation par les racines et par les microorganismes, si elle est possible (GERRETSEN, 1949 ; TARDIEUX-ROCHE, 1966 ; BARBIER *et al*, 1971), n'en demeure pas moins un phénomène beaucoup trop limité pour justifier l'emploi des phosphates naturels dans de telles conditions de milieu.

C. — *L'influence de la culture*

Les observations précédentes sur le comportement de plusieurs engrais phosphatés placés dans diverses conditions pédologiques sont déduites, pour la plupart, d'études de laboratoire sans référence à la plante. Or la plante, sans laquelle la fertilisation ne trouverait plus de justification, crée une perturbation importante au niveau du sol sur la dynamique des éléments nutritifs, en particulier du phosphore.

En effet, la racine exerce à l'égard des ions phosphoriques labiles une action déplétive qui rompt les équilibres sol-solution. De plus, elle cède au niveau de la rhizosphère des protons H^+ qui, en abaissant le pH, contribuent à solubiliser des phosphates cristallisés. Pour ces raisons, elle paraît capable d'atteindre et d'utiliser des ions phosphoriques non touchés par les échanges réalisés à court terme dans les conditions d'équilibre qui président à la détermination *in vitro* du phosphore isotopiquement échangeable (E). Ainsi s'expliquent vraisemblablement les décalages observés dans les mesures du phosphore labile effectuées *in vivo* (valeurs L) ou *in vitro* (valeurs E), ces dernières déterminations étant plus particulièrement fonction des conditions expérimentales (GACHON, 1966).

Cela nous amène à une observation importante. *E ne représentant qu'une partie des ions phosphoriques réellement accessibles à la plante est une mesure qui ne permet pas d'apprécier directement si une certaine masse de phosphore incorporée au sol est demeurée totalement assimilable à l'issue de plusieurs années de contact avec le sol.* Elle n'est applicable que *relativement,* c'est-à-dire en comparant sa variation entre 2 dates t_1 et t_2 au bilan du phosphore (différence entre le phosphore apporté par les engrais et le phosphore prélevé par les récoltes et perdu par drainage). En fait, *on ne peut affirmer qu'un engrais phosphaté subit une perte de labilité dans le sol que si le maintien de E à un niveau constant nécessite un excédent de fumure sur les exportations.*

Bien que E ne soit pas une valeur « finie », elle conserve un intérêt agronomique certain parce qu'elle constitue la mesure relative la plus fiable et la moins difficile à mettre en œuvre des réserves assimilables du sol. Toute augmentation de E traduit donc pour l'agronome une amélioration de la fertilité phosphorique du sol sauf si survient simultanément une augmentation des énergies d'adsorption des ions labiles aboutissant à réduire la mobilité des réserves. Par exemple, BARBIER *et al.* (1965) ont montré que le chaulage pouvait provoquer de tels effets en sols acides.

V. — CONCLUSIONS

L'intérêt que peut tirer l'agronome de la méthode de fractionnement du phosphore appliquée à des sols ayant reçu des engrais de nature différente dépend essentiellement des caractères de mobilité qu'on peut attribuer au phosphore retrouvé dans chacune des fractions séparées. C'est le but et l'intérêt essentiel du marquage du sol à ^{32}P que de fournir un tel critère en permettant de mesurer le degré de labilité du phosphore provenant de l'engrais dans chaque fraction.

On en déduit, *quels que soient le sol et l'engrais considérés, la qualité prépondérante de la fraction P-NH_4Cl de C. et J.* — ici représentée par P-eau et P-NH_4Cl qui

font double emploi — *dont les ions sont en totalité labiles ainsi que celle de P-Al mais à un degré moindre. Par contre, le taux de labilité du phosphore de la fraction P-Ca demeure généralement faible.*

D'après cette dernière constatation, *la méthode C. et J. convient mal à l'étude du vieillissement des engrais phosphatés en sols calcaires* où la majeure partie du phosphore introduit est retrouvée dans P-Ca quel que soit l'engrais utilisé. Car le réactif sulfurique proposé ne permet pas de différencier les phosphates calciques néo-formés à partir des engrais solubles et les combinaisons phosphatées plus ou moins stables des autres engrais faiblement ou très faiblement solubles dans de telles conditions de pH. Aussi, en absence de ^{32}P, n'est-il plus possible de distinguer le comportement pourtant très différent de ces deux catégories majeures d'engrais phosphatés.

Il en est autrement en sols acides où le vieillissement des engrais phosphatés introduits se manifeste par un enrichissement prépondérant de P-Al et secondaire de P-Fe ; alors que la présence d'une surcharge observée dans P-Ca et plus encore dans P résiduel traduit au contraire une réactivité incomplète de l'engrais appliqué. Parmi les engrais étudiés relèvent de ce dernier cas : le phosphate naturel et, à un moindre degré, le phospal et les scories, en raison de leur plus faible solubilité principalement aux pH peu inférieurs à la neutralité.

Aussi, dans les sols acides où P-NH_4Cl, P-Al et P-Fe sont généralement bien représentés, les quantités de phosphore trouvées dans ces fractions pourraient refléter le niveau de la fertilité phosphorique. L'interprétation des données en serait néanmoins rendue délicate par le fait que la mobilité du phosphore varie notablement au sein de ces trois fractions et qu'inversement des ions phosphoriques labiles existent aussi dans P-Ca.

Finalement, il apparaît que l'enrichissement à moyen terme des réserves phosphatées assimilables du sol peut être jugé beaucoup plus simplement et plus sûrement par une mesure du pool labile.

Quant à l'efficacité des divers engrais phosphatés qui peut être jugée dans cette étude par le degré de labilité du phosphore retrouvé à moyen terme, on retiendra les points suivants :

Par comparaison au superphosphate qui apparaît comme un engrais d'une grande souplesse d'emploi,

— *l'engrais liquide 14-48*, mélange d'orthophosphates et de phosphates condensés d'ammonium, présente un comportement analogue dans tous les sols à l'exception peut-être des sols andiques qui sont à revoir ;

— *le phosphate bicalcique anhydre* est plus particulièrement avantageux en sols calcaires où il vieillit moins rapidement tout en restant disponible ;

— *les scories de déphosphoration* évoluent plus lentement surtout en sols carbonatés. Mais dans la mesure où leurs combinaisons silico-phosphatées complexes demeurent susceptibles de passer à plus long terme sous forme labile, elles sont intéressantes pour assurer l'entretien de la fertilité de tels sols. Les nombreuses observations culturales faites par RADET (1962) en Champagne crayeuse confirment leur bonne efficacité relative en sols calcaires ;

— *le phospal*, phosphate alumino-calcique, est à éviter dans les sols andiques, sans doute à cause de la richesse de ceux-ci en aluminium libre. Son efficacité est également limitée dans les sols acides, surtout aux pH proches de la neutralité ;

— *le phosphate naturel*, enfin, alimente lentement le pool labile du sol même dans les conditions les plus acides étudiées (pH 5,7). Son efficacité diminue à mesure que le pH s'élève.

L'effet complexe de la rhizosphère sur certaines formes cristallisées de phosphates du sol, qu'il s'agisse de phosphates précipités à partir d'ions de la phase liquide ou de particules d'engrais demeurés à l'état brut nécessite cependant de vérifier *in vivo* ces dernières conclusions sur l'efficacité relative des engrais en relation avec la nature des sols.

Reçu pour publication en avril 1973.

SUMMARY

AGEING OF DIVERSE PHOSPHATE FERTILIZERS IN RELATION TO THE TYPE OF SOIL, STUDIED BY THE CHANG AND JACKSON METHOD

Fractionation of phosphorus is carried out by the Chang and Jackson method on soil samples marked at ^{32}P taken from :

— either long duration test fields,
— or receptacles where different phosphated fertilizers were left in contact with soils of various types for three years.

The fertilizers studied are : — superphosphate, powdered dicalcium phosphate, basic slag, natural phosphate, phospal and liquid fertilizer 14-48.

The CHANG and JACKSON method did not appear to be adapted for studying the ageing of fertilizers principally in calcareous soils. By marking the soil at ^{32}P it was nevertheless possible to determine the degree of lability of the phosphorus extracted in each fraction and therefore to follow the transformation of the diverse fertilizers.

Ageing is the most rapid for water soluble fertilizers which react the most strongly with the soil. The results seem to be less important in acid soils where the products of reaction remain, most likely, accessible to the roots, but where the natural phosphate and phospal evolve incompletely.

In calcareous soils, if the natural phosphate remains practically insoluble, the powdered dicalcium phosphate would age less rapidly than the soluble phosphates whilst remaining in an assimilable form.

ZUSAMMENFASSUNG

DAS ALTERN DER VERSCHIEDENEN PHOSPHATDÜNGER IN VERBINDUNG MIT DER BODENTYPE, UNTERSUCHT NACH DER METHODE VON CHANG UND JACKSON

Die Phosphorfraktionierung wird nach der Methode von Chang und Jackson an mit P 32 markierten Proben durchgeführt, die entweder

— von Langzeitversuchsfeldern herstammen
— oder von Versuchen in Gefässen, in denen verschiedene Phosphordünger 3 Jahrelangmit ferschiedenen Bodensorten in Berührung waren.

Folgende Versuchsdünger werden verwendet : Superphosphat, Dicalciumphosphat, Thomasphosphat, natürliches Phosphat, Phospal und der flüssige Dünger 14-48.

Es stellte sich heraux, dass die Methode von CHANG und JACKSON nicht sehr geeignet ist, das Altern der Düngemittel zu untersuchen, besonders bei kalkhältigen Böden. Durch die Markierung der Böden mit ^{32}P konnte man jedoch den Labilitätsgrad des jeder Fraktion entzogenen Phosphors bestimmen und so die Veränderung der verschiedenen Düngemittel verfolgen.

Das Altern geht bei wasserlöslichen Düngemitteln, die mit dem Boden stärker reagieren, rascher vor sich. Die Folgen sind weniger stark in saurem Boden, wo die Reaktionsprodukte wahrscheinlich den Wurzeln zugänglich sind, wo aber das natürliche Phosphat und das Phospal eine unvollständige Entwicklung durchmachen.

In kalkhältigen Böden, wo das natürliche Phosphat praktisch unlöslich bleibt altert das ausgefällte Dicalciumphosphat weniger rasch als die löslichen Phosphat, wobei es jedoch in einer assimiliergaren Form erhalten bleibt.

РЕЗЮМЕ

Л. ГАШОН.

Старение фосфорных удобрений, в зависимости от типа почвы, изученное при помощи метода Чанга и Джаксона.

Фракционирование фосфора экстрагированного из образцов почв, меченных P^{32}, взятых с полей продолжительных опытов, или после опытов в вегетационных сосудах, в которых фосфорные удобрения оставлялись три года в контакте с почвами различных типов, производилось с помощью метода Чанга и Джаксона.

Испытывались следующие фосфорные удобрения : суперфосфат, двузамещенный осаженный фосфат кальция, шлаки, природный фосфат, фосфаль и жидкое удобрение 14-48.

Оказалось что метод Чанга и Джаксона не годится для изучения старения удобрений, особенно в почвах известковых. С помощью метки P^{32} удалось однако определить степень лабильности фосфора каждой фракции и проследить таким образом превращения разных удобрений.

Наиболее быстрое старение наблюдалось у водорастворимых удобрений сильнее всего реагировавших с почвой. Последствия — какбудто менее серьезны в кислых почвах, в которых продукты реакции остаются повидимому доступными корням, но где природный фосфат и фосфаль не проходят полной эволюции.

И, если в известковых почвах природный фосфат остается практически нерастворимым, двузамещенный фосфат кальция стареет в них как кажется менее быстро чем растворимые фосфаты, оставаясь в то-же время в усвояемой форме.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARVIEU J.-C., 1972. *Contribution à la connaissance de l'évolution des engrais phosphatés en sol calcaire : étude cinétique des réactions entre orthophosphates solubles et $CaCO_3$; propriétés physico-chimiques des apatites phosphocalciques formées.* Thèse Univ. Nice, 151 p.

BARBIER G., LESAINT M., QUILLON P., 1957. Sur la dissolution de phosphates peu solubles dans le sol, étudiée par la dilution isotopique. *Agrochimica*, **1**, 209-222.

BARBIER G., BILAUS J., BONIFACE R., 1965. Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol. *Ann. agron.*, **16**, 603-623.

BARBIER G., FARDEAU J.-C., MARINI P., 1971. Sur la diffusibilité des ions-phosphate du sol. *Ann. agron.*, **22**, 309-342.

BELL L. C., BLACK C. A., 1970 *a*. Transformation of dibasic calcium phosphate dihydrate and octacalcium phosphate in slightly acid and alkaline soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 4, 583-587.

BELL L. C., BLACK C. A., 1970 *b*. Crystalline phosphates produced by interaction of orthophosphate fertilizers with slightly acid and alkaline soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 5, 735-740.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.*, **84**, 133-144.

CHANG S. C., JACKSON M. L., 1958. Soil phosphorus fractions in some representative soils. *J. Soil Sci.*, **9**, 109-119.

DABIN B., 1970. Méthode d'étude de la fixation du phosphore sur les sols tropicaux. *Coton et Fibres Trop.*, **25**, 2, 213-134 et 25, 3, 289-310.

DEVINE J. R., GUNARY D., LARSEN S., 1968. Availability of phosphate as affected by duration of fertilizer contact with soil. *J. Agric. Sci. Camb.*, **71**, 359-364.

FARDEAU J.-C., MARINI P., 1971. Étude par échange isotopique de la transformation dans un sol sans végétation de divers engrais phosphatés après 35 applications annuelles. *Ann. agron.*, **22**, 113-125.

GACHON L., 1963. *Contribution à l'étude du Quaternaire récent de la grande Limagne marnocalcaire ; morphogenèse et pédogenèse.* Thèse Doctorat. Clermont-Fd. *Ann. agron.*, nº h.-s. 191 p.

GACHON L., 1966. Observations sur la mesure du phosphore isotopiquement diluable des sols. *C. R. Acad. Agric.*, **52**, 1103-1108.

GACHON L., TRIBOI E., 1970. Contrôle et évolution de la fertilité phosphorique de sols soumis à des essais de longue durée. *C. R. Acad. Agric.*, **56**, 501-511.

GACHON L., 1972. Fractionnement du phosphore labile en relation avec le type de sol. *Ann. agron.*, **23**, 429-444.

GERRETSEN F. C., 1949. The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant and Soil*, **1**, 51-63.

GLINTIC M., 1966. Retrogradation of phosphoric acid from superphosphate and its availability in acid soils of Serbia. (thesis Dr.). *Yugosl. Soc. Soil Sci.*, 11, Belgrade.

HANOTIAUX G., 1964. Le fractionnement des formes de phosphore du sol ; étude critique. *Les Rec. scient. en Agric.*, **1**, 173-190.

HARTER R. D., 1969. Phosphorus adsorption sites in soils. *Proc. Soil Sci. Amer. Soc.*, **33**, 630-631.

HERNANDO V., LOMBARDIA V., PARDO M. T., 1971. Effect of superphosphate and of nitrogen and potassium fertilization on the active fractions of phosphorus in some soils. *Agrochimica*, **15**, 193-201.

KAILA A., 1963. Phosphorus conditions at various depths in some mineral soils. *J. Sci. Agric. Soc. Finland*, **35**, 2, 69-79.

KHANNA P. K., 1967. Inorganic soil phosphate fractions as related to soil-test values by common methods. *Plant and Soil*, **26**, 2, 277-284.

KHANNA S. S., MAHAJAN K. K., 1971. A study of the behaviour of added phosphates in soils of variable physico-chemical properties. *Intern. Symp. Soil Fert. Eval. Proc.*, New Delhi, 725-736.

LAVERTY J. C., MC LEAN E. O., 1961. Factors affecting yield and uptake of phosphorus by different crops : III. Kinds of phosphate-native, applied and formed. *Soil Sci.*, **91**, 166-171.

LAWRENCE MASSEY D., SHEARD. R. W., MILLER M. H., 1970. Availability of reaction products of fertilizer phosphorus to alfalfa and bromegrass seedlings. *Canad. J. Soil*, **50**, 2, 141-149.

LIBISELLER R., 1969. Boden-pH, Düngerphosphate und Bodenuntersuchung. *Z. Pflanzenernähr.*, **123**, 1, 33-48.

MACHOLD O., 1963. De la forme de combinaison du phosphate « labile » dans le sol. *Z. Pflanzenernähr.*, **103**, 132-138.

MANNING P. B., SALOMON M., 1965. Forms of phosphorus in soil after long-continued fertilization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29**, 421-423.

MATTINGLY G. E. C., PENNY A., 1968. Evaluation of phosphate fertilizers. I. Immediate value of dicalcium phosphate, nitrophosphates, gafsa rock phosphate, basic slag and potassium metaphosphate for barley and ryegrass. *J. Agric. Sci. Camb.*, **70**, 131-138.

MATTINGLY G. E. C., 1968. Evaluation of phosphate fertilizers. II. Residual value of nitrophosphates, gafsa rock phosphate, basic slag and potassium metaphosphate for potatoes, barley and swedes grown in rotation, with special reference to changes in soil phosphorus status. *J. Agric. Sci. Camb.*, **70**, 139-156.

PROBERT M. E., LARSEN S., 1970. The stability of dicalcium phosphate dihydrate in soil. I. Laboratory studies. *J. Soil Sci.*, **21**, 2, 353-358. II. Pot experiments. *J. Soil Sci.*, **21**, 2, 359-363.

RADET E., 1962. Contribution à l'étude du comportement des engrais phosphatés dans les sols de craie. *Bull. Assoc. Fr. Ét. Sol.*, nº 5.

SHELTON J. E., COLEMAN N. T., 1968. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32**, 91-94.

SINGH R. N., MARTENS D. C., OBENSHAIN S. S., 1966. Plant availability and form of residual phosphorus in Davidson clay loam. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **30**, 617-620.

SMITH A. N., 1968. The uptake of phosphorus by wheat and clover from four inorganic soil phosphate fractions after the addition of contrasting types of phosphatic fertilizer. *Plant and Soil*, **29**, 144-153.

STRONG J., RACZ G. J., 1970. Reaction products of applied orthophosphates in some Manitoba soils as affected by soil calcium and magnesium content and time of incubation. *Soil Sci.*, **110**, 258-262.

SUTTON C. D., LARSEN S., 1969. Immobilization of applied phosphate in soil. *Welsh Soils Disc. group Rep.*, n° **10**, 37-41.

TARDIEUX-ROCHE A., 1966. *Contribution à l'étude des interactions entre phosphates naturels et microflore du sol.* Thèse Fac. Sc. Paris.

ZHUKOV S. N., GORINA L. G., 1971. Effect of lime and superphosphate in group composition of phosphates of sandy loamy soil in a long-term field experiment. *Agrokhimiya*, **4**, 22-25.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire:* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé* suffisamment précis (250 mots max.) pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible; e) *discussion et conclusion;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborateurs, les fonds, les dons...; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet.* Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals,* ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

Agronomie.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1973

Dépôt légal : 4e trimestre 1973. N° d'impression : 1471.

annales agronomiques

Bimestriel

1973

Vol. 24. N° 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs
et de l'Institut national de la Recherche agronomique
à l'exception des résumés

Ann. agron., 1973, **24** (6), 615-637.

LES ÉCOULEMENTS DE FILTRATION DANS LE KAOLIN ET LA LOI DE DARCY (1)

J. HABIB
avec la collaboration technique de F. ESTÉBAN et L. HELLEUX

Chaire de Génie Rural,
École Nationale Supérieure Agronomique,
35042 Rennes Cedex

RÉSUMÉ

La perméabilité à l'eau des argiles est l'objet de controverses. Est-elle constante ou variable ? Existe-t-il un seuil de gradient hydraulique au-dessous duquel l'argile devient imperméable ? On trouve des théories et des expérimentateurs pour justifier chaque assertion.

Nos essais sur le kaolin ne permettent ni de confirmer l'existence d'un tel seuil, ni d'admettre une perméabilité indépendante du gradient hydraulique, puisqu'elle diminue très rapidement avec les faibles gradients.

Il a été possible d'établir une relation entre la perméabilité, la porosité d'un kaolin et le gradient hydraulique moteur.

I. — INTRODUCTION

I. 1. — *Exposé du problème*

Il y a plus d'un siècle, DARCY (1856) établissait une loi de la filtration dans les milieux poreux : lorsque l'eau s'y écoule entre deux réservoirs (fig. 1) dont la différence de cote des surfaces libres est H, à travers un filtre prismatique de section S et de longueur L, le débit Q est donné par la formule :

$$Q = S \cdot K \cdot J$$

où : $J = H/L$ est le gradient hydraulique.

(1) Ce travail est extrait d'une thèse de Doctorat d'État soutenue à l'Université Paul Sabatier de Toulouse le 21 juin 1971 et dirigée par le professeur THIRRIOT (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse).

Les vérifications expérimentales, fort nombreuses pour les milieux à gros pores et les sables, ont montré que le facteur de proportionnalité K, perméabilité au sens de Darcy, restait pratiquement constant tant que le nombre de Reynolds de l'écoulement

$$\mathcal{R} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

ρ = masse volumique du liquide,
μ = viscosité du liquide,

demeurait assez faible. Il est d'ailleurs difficile de l'évaluer en toute rigueur, puisque D est un diamètre caractéristique des pores, et V la vitesse du liquide.

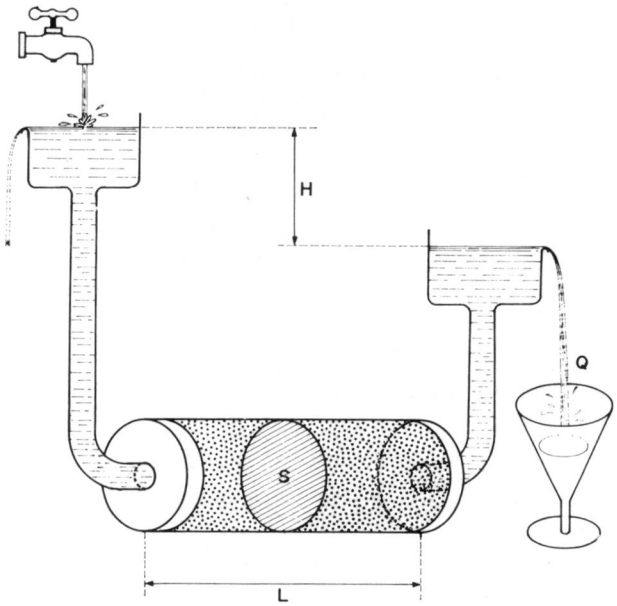


FIG. 1. — *Représentation schématique de l'expérience de* DARCY

On a une explication de cette limite supérieure en se référant au modèle capillaire du milieu poreux, faisceau de N tubes rectilignes de faible diamètre D, où l'écoulement se fait suivant la loi de débit de Poiseuille :

$$Q = N \cdot \frac{\pi \cdot D^4}{128} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot J$$

ou

$$V = \frac{1}{32} \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot D^2 \cdot J$$

à condition que le régime soit laminaire, c'est-à-dire que $\mathcal{R}$ soit inférieur à la valeur limite 2 400. En fait, avec le choix habituel de D et de V, on constate une diminution de la perméabilité pour les valeurs de $\mathcal{R}$ supérieures à 1 dans les milieux poreux. Pour les valeurs inférieures, on ne signale pratiquement pas d'anomalies, ce qui est conforme à la théorie.

Par contre, dès qu'on parle de milieux argileux, les opinions divergent. C'est pourquoi il nous a paru utile de faire le point sur ce problème et d'effectuer quelques vérifications en utilisant un minéral argileux dont le comportement est relativement simple : la kaolinite. Il ne s'agit pas seulement de considérations théoriques, mais d'un fait pratique important, puisque certains affirment que les argiles sont totalement imperméables au-dessous d'un certain seuil de gradient hydraulique.

Il est facile d'imaginer qu'à partir d'une assez faible proportion d'argile, un sol se comporte au point de vue de la perméabilité comme s'il était purement argileux ; en fait, ce n'est pas exact, du moins sans faire intervenir des propriétés complémentaires. Plaçons-nous en effet dans le cas d'un milieu composé de billes de verre de même diamètre, arrangées régulièrement. Si l'arrangement est continu (pas de billes manquantes), la porosité varie entre 26 et 48 p. 100. Supposons-la de 36 p. 100, valeur moyenne, et remplissons les vides avec de l'argile qui ne peut elle-même qu'être poreuse — mettons à 44 p. 100 ce qui est une valeur normale. La porosité effective de l'éprouvette ainsi constituée est de 16 p. 100, et l'argile occupe en fait 20 p. 100 du volume total, le quart du volume solide. L'eau ne peut évidemment circuler que dans l'argile, le squelette de billes ne faisant que réduire la section efficace de passage. Or, cette valeur de 25 p. 100 d'argile est celle qui caractérise les sols argileux du point de vue agronomique. Il est remarquable que l'expérience ait confirmé ces valeurs (HABIB, 1971 ; HABIB et THIRRIOT, 1971).

1. 2. — *Présentation des travaux antérieurs*

On trouve peu de travaux effectués avec précision, peut-être à cause du nombre de paramètres et de la durée des essais. Pour la commodité de l'exposé, remarquons que la perméabilité au sens de Darcy dépend à la fois du milieu poreux et du liquide filtrant. L'analyse dimensionnelle, ou tout simplement l'analogie de Poiseuille montre que la perméabilité peut s'écrire (en séparant les paramètres relatifs au liquide) sous la forme :

$$K = \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot k$$

où k est la perméabilité géométrique ou intrinsèque. On l'exprime en unités de surface (microns carrés μ^2 par exemple), alors que K est homologue à une vitesse (les unités étant exprimées, bien entendu, dans un système homogène). On voit bien alors que K ne peut être constant, puisque la viscosité varie avec la température. Par contre k est caractéristique du matériau, et c'est lui que nous étudierons après avoir vérifié l'influence de la température.

Comme nous l'avons vu, la loi de DARCY est bien vérifiée, quoique KING (1898) signale déjà des anomalies pour les argiles. Mais HUBBERT (1940) l'admet, et MUSKAT (1946) ne pose pas la question ; ZUNKER (1932) pense qu'au voisinage de l'argile, l'eau est immobilisée, ce qui l'empêche d'appliquer la formule de Kozeny, mais il ne parle pas de celle de Darcy. Ce n'est qu'en 1954 que paraissent des publications (portant d'ailleurs sur du grès), et plus récemment les synthèses de SCHWARTZENDRUBER (1967) et de KUTILEK (1968) rapportant les cas recensés. On voit sur le graphe de ce dernier (légèrement modifié) les types d'écarts constatés (fig. 2).

Pour les expliquer, on peut dire, comme OLSEN (1965), que tous se trompent, que les mesures sont mal faites, que les modifications à l'interface liquide-verre-air

dans les tube piézométriques et les microburettes suffisent à expliquer les écarts : c'est en effet possible. Lui-même effectue des essais en modifiant le principe de la mesure, injectant un débit connu et mesurant la différence de pression avec un manomètre à membrane ; et il semble vérifier la loi de Darcy. L'ennui, c'est qu'il

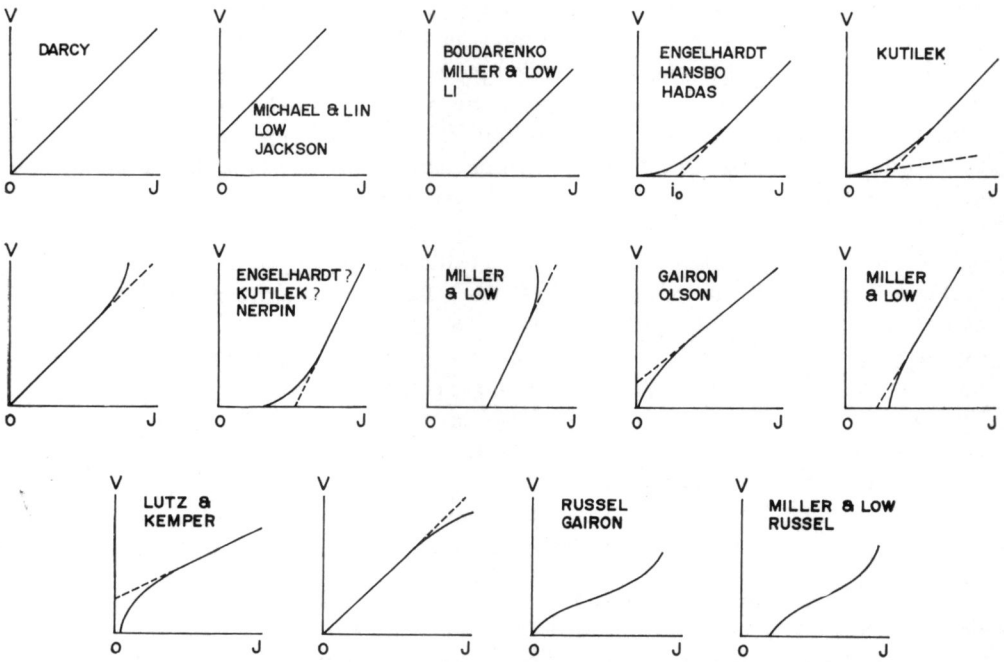


FIG. 2. — *Graphes de Kutilek représentant les lois d'écoulement de l'eau dans les milieux poreux pour divers auteurs*

trouve pour le kaolin en question une perméabilité $K = 1{,}97\ 10^{-5}$ cm/s ($k = 2 \cdot 10^{-2}$ μ^2) pour une porosité de 0,575, c'est-à-dire cent fois plus forte que celle généralement signalée par les auteurs. On peut alors se demander si la préparation de l'éprouvette n'a pas favorisé un cheminement préférentiel, une macroporosité, ou un écoulement pariétal.

KUTILEK (1964, 1968) au contraire, s'il élimine comme OLSEN une partie des écarts constatés, explique par un comportement rhéologique anormal de l'eau au voisinage des argiles les seuils de gradient qu'il obtient, puisqu'elles lui paraissent souvent imperméables : l'eau serait un fluide de Bingham, comme le suggère l'école soviétique.

Notre premier soin a donc été de reprendre les vérifications expérimentales.

2. — TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

2. 1. — *Les matériaux*

Il s'agit essentiellement de Kaolin de Ploemeur (Morbihan) tel qu'il est livré par l'usine après concassage et lavage. Une longue filtration d'eau distillée l'a débarrassé des sels libres. Les examens aux rayons X le montrent presque pur (quelques traces de quartz), mais une nouvelle livraison

de même origine destinée aux derniers essais montre au microscope électronique un peu de mica. Sa surface spécifique (B. E. T.) est de 13 m^2/g, donc relativement faible ; sa masse spécifique mesurée au picnomètre et à l'eau est 2,73 g/cm^3.

En passant ce kaolin au four à 1 200°, on le transforme en mullite. Sa surface spécifique tombe alors à 2,9 m^2/g, et la masse spécifique, à 2,4 g/cm^3.

2. 2. — *Les appareils*

Les mesures s'étalant sur plusieurs années, l'appareil a été modifié au fil des ans, d'autant plus qu'il nous fallait tenir compte des critiques d'Olsen, et reprendre son dispositif.

Au départ, on reconnaît l'œdomètre classique des laboratoires de sols (fig. 3), modifié par

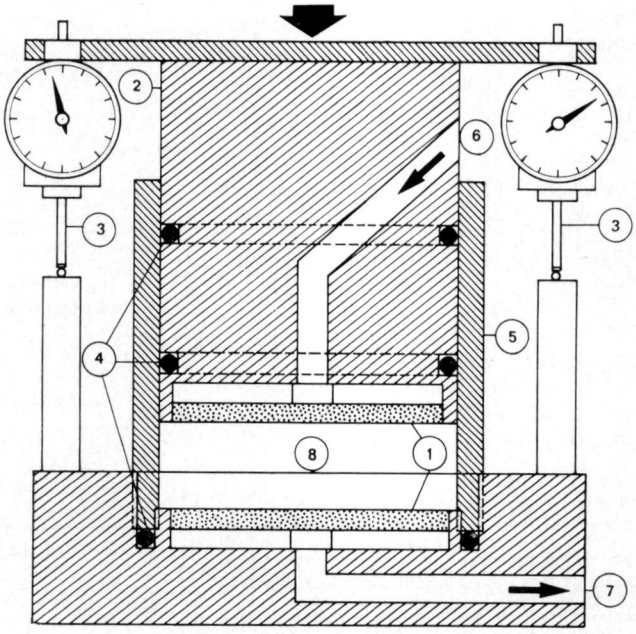


Fig. 3. — *Schéma de l'Œdomètre*

1 pierres poreuses
2 piston
3 micromètre à cadran
4 joints toriques
5 cylindre
6 entrée de l'eau
7 sortie de l'eau
8 échantillon

l'utilisation d'une microburette horizontale et un débouché dans un vase à grande section pour que la charge reste constante; plus tard avec deux microburettes pour mesurer les débits entrant et sortant. L'étanchéité a été améliorée par l'adjonction de joints toriques (fig. 4).

Le point le plus important est la constance de la température de l'eau durant chaque essai, et sa mesure précise. Nous avons travaillé dans une cave où la température ne variait que très lentement, tant que l'observateur n'y faisait que de brefs séjours pour les mesures. La température de l'eau et celle de la cave s'égalisaient rapidement.

Pour suivre les déplacements des ménisques dans les microburettes et les piézomètres, nous avons imaginé ce que nous appelons la méthode de la focale. Sur une échelle située à quelques millimètres derrière lui, un tube plein d'eau donne d'une source lumineuse ponctuelle éloignée une image linéaire très brillante, se détachant sur la zone d'ombre portée du verre et s'arrêtant nettement avec le ménisque. Il est alors possible de constater la coïncidence avec un trait de graduation à un dixième de millimètre près, ce qui est aussi précis qu'un cathétomètre et donne des mesures plus rapides (fig. 5). Il suffit de disposer des échelles horizontales et verticales.

Un soin particulier doit être apporté dans le choix, le nettoyage et la mesure des tubes calibrés. Pour les dernières séries, ceux-ci ont été siliconés.

Pour reproduire le dispositif d'Olsen, on a utilisé le « Perfusor B. Braun » comportant une seringue fixe et un piston entraîné à vitesse constante par un moteur électrique et une boîte de

vitesses à 24 rapports. Un capteur piézométrique différentiel à membre déformable couplé à un galvanomètre préalablement étalonné donnait la perte de charge. Nous avons dû l'abandonner à cause de sa « respiration » gênante pour les faibles débits utilisés : le régime transitoire durait trop longtemps.

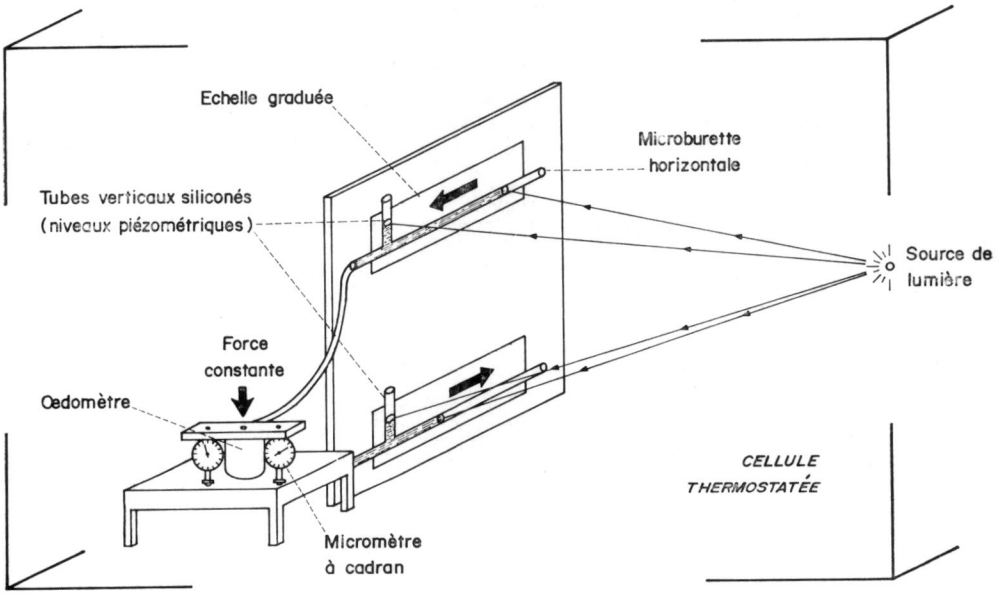


FIG. 4. — *Montage de mesure de la perméabilité*

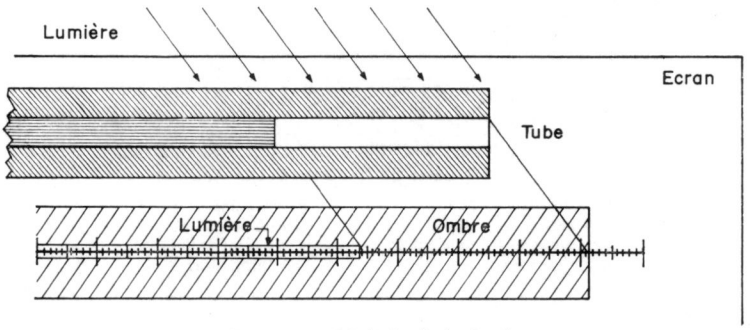


FIG. 5. — *Méthode de la focale*

2. 3. — *Préparation de l'éprouvette*

C'est un point important. Les écueils à éviter sont d'abord un mauvais remplissage par emprisonnement d'air ou d'eau dans la masse d'argile, ou la création de fissures et de canalicules. Ensuite, étant donnée la structure lamellaire de l'argile, on pourrait espérer une orientation aléatoire des faces planes entre elles ; mais le maintien d'une telle organisation pendant la compression de l'éprouvette lors de modifications de porosité, est plus que douteux. On peut, au contraire, partir d'un arrangement plus ou moins parallèle des lamelles (favorisé par l'introduction à l'état de limite de liquidité de la pâte de kaolin dans l'œdomètre), et une mise en place obtenue en tassant par des chocs répétés la pâte, ce qui se traduit par un léger excès d'eau en surface, indice d'un arrangement plus serré. Dans ce dernier cas, les compressions successives de l'éprouvette doivent modifier les distances entre les particules plus que leur orientation et leurs positions respectives.

Des essais de mise en place dans l'appareil d'éprouvettes de kaolin sec, mises ensuite sous vide, et saturées par introduction d'eau désaérée n'ont pas été convaincants : il se produisait,

pendant la pénétration de l'eau ou de vapeur d'eau sous une différence de pression trop forte, des passages préférentiels importants (même avec des milieux plus perméables que l'argile pure). Nous avons donc systématiquement employé la mise en place à la limite de liquidité.

On pourrait craindre un écoulement pariétal. Or, pour assurer le glissement du piston dans le cylindre, celui-ci est préalablement enduit d'une couche de graisse dans laquelle s'incrustent les particules de kaolin. Il est cependant arrivé accidentellement que la compression cesse. Sous la pression de l'eau de filtration l'éprouvette peut alors se détacher du cylindre et glisser. Mais la première mesure montre l'excès de débit et le rétablissement de la charge mécanique supprime cet écoulement.

2. 4. — *Les mesures*

L'écrasement de l'éprouvette à partir d'une hauteur initiale connue est mesurée par deux micromètres à cadran au centième de millimètre, et nous en donne la hauteur h. Le calcul de la perméabilité nécessite aussi la connaissance du débit liquide Q obtenu en mesurant le temps t mis par le ménisque pour se déplacer de L dans la microburette de section s : $Q = \frac{L \cdot s}{t}$.

Alors, si S est la section de l'œdomètre, H la différence de cote entre les ménisques dans les piézomètres,

$$K = \frac{s \cdot h \cdot L}{t \cdot H \cdot S} \qquad \text{et} \qquad k = K \frac{\mu}{\rho \cdot g}.$$

Pour faciliter les comparaisons, toutes les mesures de perméabilité ont été ramenées à 20° par correction de viscosité cinématique de l'eau (Hugues, 1948). Dans ce cas, $\frac{\rho \cdot g}{\mu} = \frac{981}{0{,}010\,06}$ et à K = 1 cm/s correspond $k = 1{,}026.10^{-5}$ cm^2 = 1,026.10^3 μ^2.

La précision des mesures est très variable. Si nous écartons les erreurs possibles sur S et s, qui sont systématiques, les grandeurs sont toutes connues à moins de 10^{-3} près, sauf H dont la précision est de l'ordre du centième pour les plus faibles charges. Mais le paramètre le plus important est la température : pour un dixième de degré d'écart, l'erreur relative sur la viscosité cinématique de l'eau est 3.10^{-3}, donc aussi importante en moyenne que toutes les autres réunies.

3. — LES RÉSULTATS

Nous les examinerons en énumérant les paramètres qui pourraient intervenir dans la perméabilité des argiles.

3. 1. — *La température*

Nous avons vu que la viscosité de l'eau varie rapidement avec la température. Restait à vérifier qu'elle n'a pas d'autre action. L'amplitude de variation de la température est restée faible durant nos essais, mais les corrections de viscosité faites ont donné une bonne concordance des perméabilités mesurées sur une même éprouvette, à des températures différentes (tabl. 1).

TABLEAU I

Constance de la perméabilité intrinsèque en fonction de la température

Date	h cm	T °C	ΔH cm	L cm	Durée s	K × 10^7 cm/s	$k \cdot 10^{12}$ cm^2	P (Porosité)
5/2/53	0,780	8,0	56,95	55,8	4 579	1,250	1,721	0,528
29/2/53	0,780	8,8	57,00	53,8	4 306	1,281	1,724	0,528

Les variations de température du local étant très lentes, les mesures correspondent à un intervalle de temps assez grand. En conséquence, nous avons pu borner notre exposé à l'étude de la perméabilité intrinsèque k, et nous n'avons constaté aucune anomalie pour une variation de température du local atteignant une amplitude totale de 10°, du fait des corrections de viscosité effectuées.

3. 2. — *Le temps*

Sous l'effet de la compression, l'échantillon s'écrase, tendant vers une hauteur qui se stabilise suffisamment au bout de quelques jours pour qu'on puisse la considérer comme constante pendant la durée d'une série de mesures : pour $h = 12$ mm, $\Delta h = 2/100$ mm entre le 5e et le 30e jour, 0,01 mm au cours du 2e mois. C'est le phénomène de la consolidation des argiles. Dès lors que les mesures de perméabilité faites à plusieurs semaines d'écart ne donnent pas de résultats différant de plus que l'erreur expérimentale prévue, on peut conclure que l'influence du temps est nulle. C'est ce que l'on constate, que la circulation d'eau ait cessé ou non. On peut en conclure qu'il n'y a pas eu de développement de bactéries ou de modification de la géométrie de l'éprouvette du fait de la durée des essais, en dehors de la consolidation (tabl. 2).

TABLEAU 2

Influence du temps sur la perméabilité

Date	T °C	Charge ΔH cm	Déplacement L cm	Durée s	Perméabilités	
					K · 10^7 cm/s	$k \cdot 10^{12}$ cm²
du 23-3-53 au 25-3-53	11,3	56,85	53,8	5 886	0,872	1,093
	11,3	46,85	54,3	7 335,2	0,857	1,074
	11,4	36,85	55,2	9 404,8	0,864	1,079
	11,4	16,9	54,3	20 711	0,841 5	1,051
	11,5	46,85	55,8	7 324	0,882	1,097
	11,5	26,92	53,8	12 540	0,865	1,077
	11,5	6,9	25,6	24 360	0,826	1,031
du 14-4-53 au 18-4-53	11	56,95	53,8	5 890	0,870	1,099
	11	36,95	53,8	9 169,4	0,861	1,088
	11,2	46,95	54,8	7 242,5	0,874	1,095
	10,8	26,95	54,2	12 903	0,847	1,076
	11	16,95	55,8	21 143,5	0,845	1,066
	11,2	16,97	27,9	25 580	0,849	1,066

3. 3. — *Influence de la porosité*

Comme on le sent intuitivement, la perméabilité diminue avec la porosité. Si on représente les valeurs de k obtenues sous le même gradient hydraulique en fonction de la porosité, on obtient en coordonnées semi-logarithmiques une droite (fig. 6). On a tracé sur le même graphe les résultats très proches trouvés par MICHAEL et

LINS (1954) et, à un facteur constant près pour en comparer les pentes, les graphes des formules classiques ainsi que celui de la fonction :

$$k' = \frac{(P - 0{,}2\ (1-P))^3}{(1-P)^2} = \frac{(1{,}2\ P - 0{,}2)^3}{(1-P)^2}$$

qui semble être plus proche de nos résultats. L'expression directe serait :

$$k = 1{,}91 \cdot 10^{-7}\ e^{12{,}8\ P}$$

k étant exprimé en μ^2.

Cette formule empirique ne vérifie pas la condition limite :

$$k = 0 \qquad \text{si} \qquad P = 0$$

Elle ne vaut donc que pour le domaine des porosités que nous avons exploré.

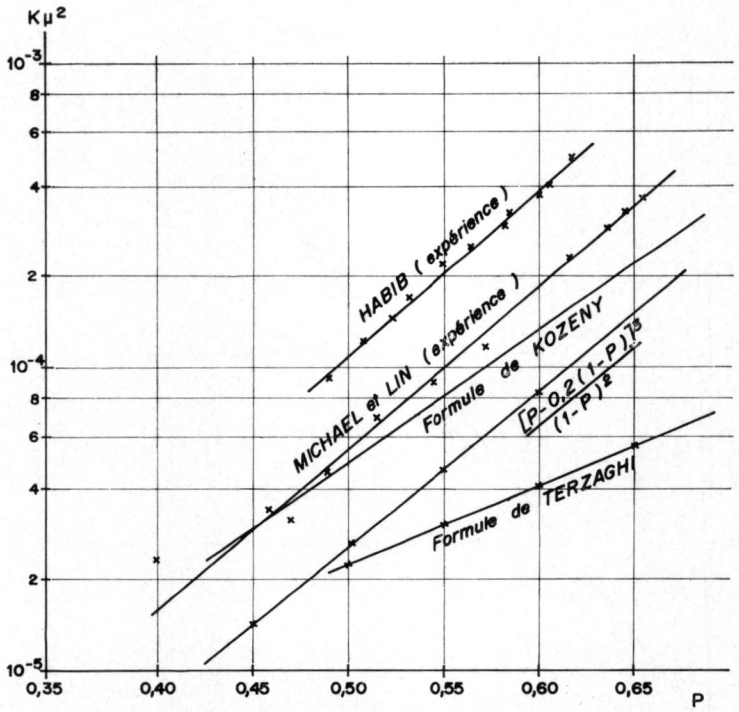


FIG. 6. — *Variation de la perméabilité avec la porosité à gradient constant* (résultats expérimentaux et formules proposées, à un facteur constant près)

3. 4. — *Influence du gradient hydraulique*

Nous retiendrons pour l'étude de ce paramètre une série de mesures faites avec un appareillage semblable à celui utilisé par OLSEN, mais en représentant sur un même graphe, en fonction du gradient hydraulique J :

— d'une part, la vitesse de filtration V de Darcy,

— d'autre part, la perméabilité K au sens de Darcy, calculée d'après la relation $V = K \cdot J$.

Si V semble être effectivement proportionnel à J (droite passant par l'origine), l'analyse plus fine des résultats, faite en calculant K, montre que ce dernier n'est pas constant puisque, dans ce cas, on aurait une droite parallèle à l'axe des J, alors que le graphe (fig. 7) semble au contraire tendre vers zéro pour les faibles gradients.

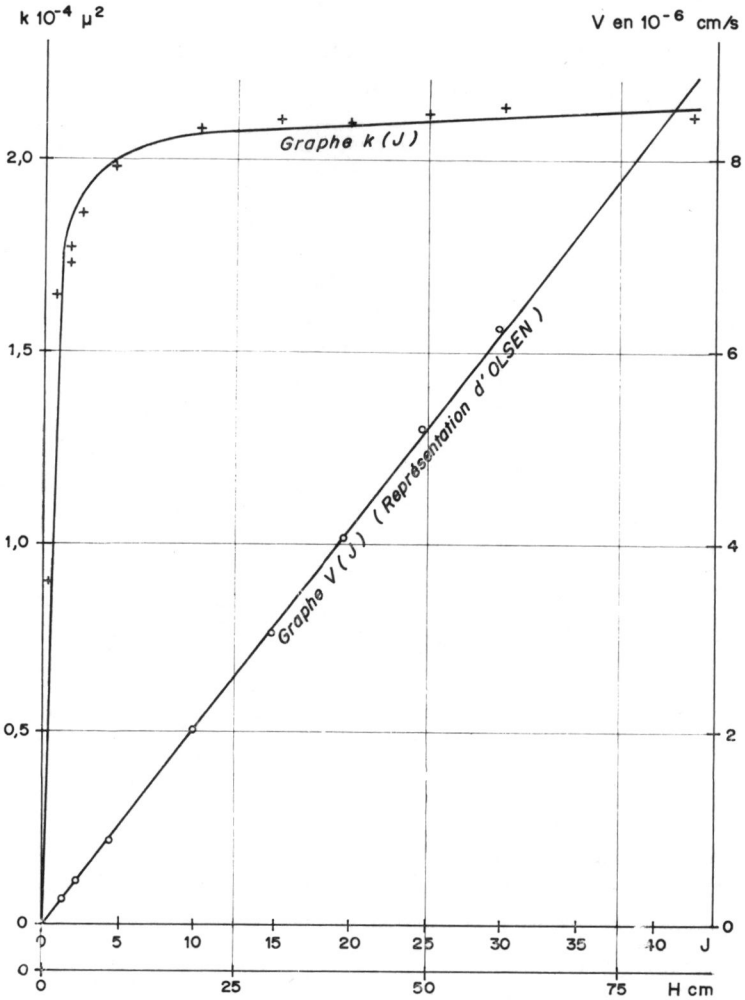


FIG. 7. — *Graphes* v = f(j) *et* k = f(j) *relatifs au même essai*

Par la suite, nous exploiterons de préférence les deux séries représentées sur la figure 8, correspondant à deux éprouvettes différentes, où les relations perméabilité-porosité-gradient hydraulique sont plus visibles quoique moins poussées vers les faibles gradients.

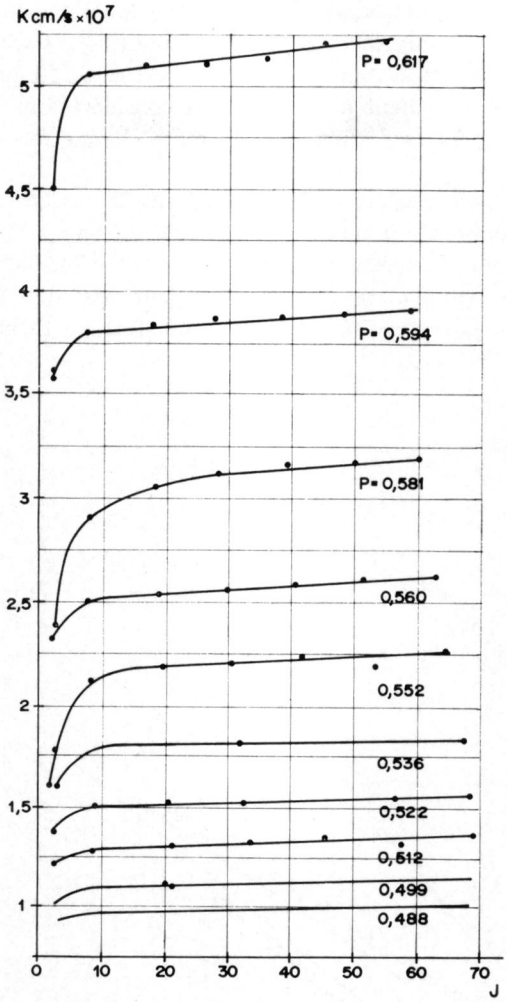


FIG. 8. — *Représentation graphique des résultats de mesure de la perméabilité du kaolin*

3. 5. — *Essai sur la Mullite*

Nous avons voulu étudier le comportement d'une substance de granulométrie proche de celle de l'argile mais n'en possédant pas les propriétés de surface. L'essai fait dans les mêmes conditions met en évidence des différences de comportement. Déjà, lors de la confection de l'éprouvette, on constate qu'elle n'a pas au pétrissage la plasticité du kaolin. Par ailleurs, à compression égale, le tassement est différent, ce qui donne à penser que les déplacements relatifs des grains sont difficiles.

Alors que la perméabilité du kaolin restait pratiquement constante dans le temps, elle est ici constamment variable, soit avec le temps, soit quand on change le sens de l'écoulement ou seulement le gradient moteur. Il faut donc penser que sous la variation de ces facteurs :

a) la géométrie de l'éprouvette est modifiée ;

b) il s'effectue des colmatages favorisés vraisemblablement par l'hétérogénéité de la dimension et de la forme des grains de l'échantillon, s'accélérant sous les forts gradients qui différencient le comportement du système. L'influence du changement de sens s'interprète facilement à l'aide de ces considérations : les particules fines sont retenues par les filtres de manière différente chaque fois qu'elles sont remises en circulation.

Ces variations, pour une éprouvette de porosité P = 0,46 prise comme exemple, amènent la perméabilité de la mullite à passer de $5 \cdot 10^{-3}$ à $8 \cdot 10^{-3}$ μ^2, alors qu'on aurait pour un kaolin de même porosité $7 \cdot 10^{-5}$ μ^2, c'est-à-dire près de cent fois moins. Ceci est extrêmement révélateur et ne peut être mis au compte exclusif de la seule variation de la surface spécifique passant de 2,9 à 13 m^2/g (fig. 9).

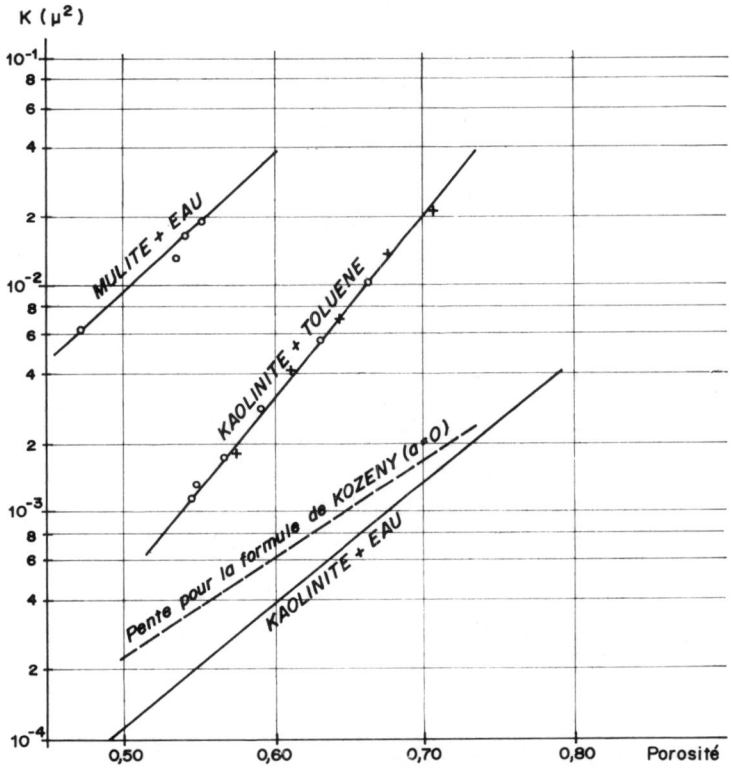


FIG. 9. — *Résultats de mesure de la perméabilité de la mullite à l'eau, et du kaolin à l'eau et au toluène, pour différentes porosités de l'éprouvette*

3. 6. — *Essai de perméabilité du kaolin au toluène*

Pour mettre en évidence l'influence de la liaison particulière argile-eau, nous avons mesuré la perméabilité du kaolin à un liquide non-polaire. Avec du kaolin préalablement séché à l'étuve, puis mélangé avec du toluène jusqu'à obtention d'une pâte à la limite de liquidité, nous avons préparé un échantillon que l'on a introduit dans l'appareil où nous avons fait circuler du toluène comme liquide filtrant. Durant la mise en place, on constate que la pâte a un toucher proche de

celui du mélange mullite-eau, mis à part l'effet de contact propre au toluène. Tenant compte des différences de viscosité et de densité, on trouve pour la perméabilité intrinsèque des valeurs, à porosité égale, 5 à 10 fois plus fortes qu'avec l'eau (fig. 9).

3. 7. — *Comparaison des résultats obtenus sur kaolin et sur mullite*

Nous pouvons dès à présent chercher à interpréter ces résultats. Pour comparer des corps de surface spécifique différente, nous nous appuierons sur la formule de Kozeny sous la forme donnée par Carman :

$$k = \frac{C}{S_s^2} \frac{P^3}{(1 - P)^2}$$

où C est une constante dépendant de la forme des conduits ;

S_s la surface spécifique du matériau ;

P la porosité.

La perméabilité variant dans le rapport inverse des carrés des surfaces spécifiques, on devrait trouver entre les perméabilités du kaolin k_k et de la mullite k_m le rapport :

$$\frac{k_k}{k_m} = \frac{S_m^2}{S_k^2} = \left(\frac{2{,}9}{13}\right)^2 = 0{,}05$$

à condition que C reste constant.
En nous reportant à la figure 9, on trouve pour la porosité 0,55

$$k_k = 2{,}1 \cdot 10^{-4}\ \mu^2 \qquad k_m = 1{,}8 \cdot 10^{-2}\ \mu^2 \qquad k_k/k_m = 0{,}011$$

La perméabilité du kaolin à l'eau est donc 5 fois plus faible que ne le laisse prévoir le simple rapport des surfaces spécifiques. Mais si le contact entre l'eau et la mullite était semblable à celui du kaolin et d'un liquide non-polaire, il faudrait alors comparer la perméabilité du kaolin au toluène k_k' à k_m. Pour la même valeur de P, on a alors :

$$k_{k'} = 1{,}2 \cdot 10^{-2}\ \mu^2 \qquad k_m = 1{,}8 \cdot 10^{-2}\ \mu^2 \qquad k_{k'}/k_m = 0{,}066$$

On voit ici que nous sommes bien dans le même ordre de grandeur.

Il apparaît donc nettement que la surface spécifique n'explique pas à elle seule l'écart de perméabilité, puisque, pour le kaolin, la perméabilité au toluène entre dans le cadre de la formule de Carman, tandis que celle à l'eau s'en écarte. La seule explication possible réside bien dans les phénomènes de surface, inexistants lors de la filtration du toluène liquide non-polaire. Ceci conduit à mettre en cause l'eau adsorbée.

4. — INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Ce qui frappe immédiatement dans l'analyse des résultats obtenus sur le kaolin, c'est d'abord le fait que les écarts à la loi de Darcy se produisent alors que les nombres de Reynolds des écoulements sont très faibles. Ensuite, ce phénomène semble être

propre aux argiles, puisqu'aucune anomalie n'a été signalée pour les sables et les limons aux faibles nombres de Reynolds. C'est donc du côté des particularités des argiles que nous devons trouver une explication.

4. 1. — *Rappel de quelques propriétés des argiles*

Si l'on considère comme argile la classe des grains de dimension inférieure à 2 microns, le matériau constitutif de la mullite entre dans ce groupe ; or, les résultats obtenus sont différents. Il faut donc s'attacher aux propriétés spécifiques du minéral argileux, et plus précisément aux phénomènes de structure et de surface. En effet, les argiles et particulièrement le kaolin possèdent une structure lamellaire. Aux brisures se situent des charges électriques positives ou négatives, d'où l'existence d'un potentiel zéta. La densité des charges dépend du type de l'argile et leur effet de la composition de la solution. En un sens, la capacité d'échange d'ions en est un indicateur possible.

En outre, pour n'importe quel écoulement dans un conduit, la surface de contact liquide-solide est un facteur important. Du fait des propriétés particulières des argiles, celles-ci se comportent différemment des autres minéraux de même granulométrie. Nous avons précisé qu'avec l'azote liquide l'adsorption est faite sur 13 m^2/g pour le kaolin contre 2,9 m^2/g pour la mullite.

4. 2. — *Notion de porosité cinématique. Formule de Kozeny modifiée*

On conçoit qu'à côté de la porosité géométrique P définie comme proportion des vides dans le milieu, on soit amené à considérer une porosité cinématique P* proportion des vides effectivement disponible à la circulation de l'eau. Dans notre optique, où il ne s'agit pas des conduits perpendiculaires à l'écoulement mais d'une certaine épaisseur ε d'eau adsorbée à la surface de l'argile σ, on peut écrire que la surface d'adsorption est proportionnelle au volume solide (1—P), et que l'eau adsorbée par unité de volume est $\varepsilon \cdot \sigma = a(1 - P)$ où a est le facteur de rétention.
La porosité cinématique s'établit alors à :

$$P^* = P - a(1 - P)$$

Dans la formule de Carman, le dénominateur représente l'aire de contact solide-liquide par unité de volume ; mais au numérateur il s'agit effectivement de la porosité cinématique. Ainsi on écrira, en groupant sous l'écriture $k_o = C/S_s^2$ les termes qui ne dépendent pas en principe de la porosité :

$$k = k_o \cdot \frac{[P - a\,(1 - P)]^3}{(1 - P)^2} \qquad [1]$$

Nous avons signalé au passage la bonne concordance de cette formule avec les résultats expérimentaux pour $a = 0{,}2$, k_o prenant alors la valeur $4{,}65 \cdot 10^{-4}\ \mu^2$ compte non tenu de la variation avec le gradient hydraulique (la figure 6 est faite pour $J = 30$).

4. 3. — *Interprétation des écarts à la loi de Darcy*

Nous pouvons écarter l'hypothèse d'Olsen d'après qui les écarts constatés seraient dus essentiellement au contact eau-verre du ménisque dans les microburettes.

En effet, nos essais effectués avec un appareillage semblable au sien ont montré des écarts notables. De plus, l'analyse de nos résultats (en supposant possible une telle erreur expérimentale) montre que les écarts subsistent après correction.

Pour tenir compte de l'action de surface des argiles, certains auteurs ont assimilé l'eau qui s'écoule dans des tubes capillaires très fins, à un liquide de Bingham. Cette hypothèse repose sur des observations qui, curieusement, ne sont pas limitées aux seuls matériaux argileux puisqu'on les retrouve pour des capillaires de verre et l'argile cuite (BONDARENKO et NERPIN, 1964). Pour ces auteurs, l'eau fixée a des propriétés différentes de celles de l'eau libre, et en particulier une rigidité. Ils sont ainsi conduits à une relation entre la contrainte appliquée à l'eau τ, et la vitesse de l'eau ε' de la forme :

$$\tau = \tau_o + \mu \cdot \varepsilon'$$

Comparée à celle qui caractérise le fluide visqueux newtonien :

$$\tau = \mu \cdot \varepsilon'$$

on voit que la vitesse du fluide ne cesse d'être nulle que si $\tau - \tau_o$ devient positif, c'est-à-dire quand la pression appliquée est suffisamment élevée : d'où la notion de seuil d'écoulement.

Pour un liquide de Newton en mouvement laminaire dans un tube cylindrique, la répartition des vitesses dans le plan diamétral est parabolique. Un fluide de Bingham ne s'écoule qu'à partir d'une certaine pression ; alors, l'indicatrice des vitesses est une parabole tronquée, le palier diminuant de diamètre quand la pression croît, devenant pratiquement nul quand τ_o est négligeable devant $\mu \cdot \varepsilon'$ (fig. 10).

Quelques auteurs ont signalé un tel seuil de gradient. Nos essais, tant sur le kaolin que sur la montmorillonite (où il serait pourtant plus élevé), ne l'ont pas mis en évidence.

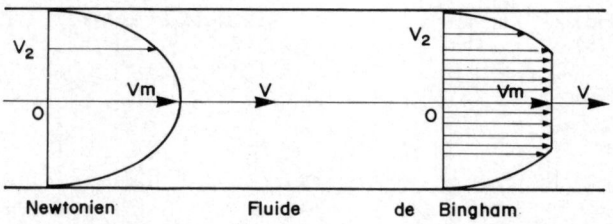


FIG. 10. — *Distribution des vitesses d'un fluide dans un plan diamétral d'un tube circulaire*

Pour expliquer ces anomalies, les chercheurs ont tenté d'établir des lois de répartition de vitesse compatibles avec les débits obtenus, en les appliquant au modèle capillaire classique et bien entendu à diamètre constant.

Dans l'hypothèse de BONDARENKO et NERPIN, toute l'eau filtrante est binghamienne, même si les pores sont relativement gros, ce qui n'est pas vraisemblable. La loi de débit est celle de Buckingham.

KOVACS (1969) introduit dans le modèle de Bingham un effort tranchant statique inversement proportionnel à la distance à la paroi, ce qui répond à la critique précédente et maintient l'hypothèse du seuil de gradient considéré par lui comme fait expérimental. Il établit ainsi une loi de débit relativement simple, fonction de la valeur de ce seuil.

KLAUSNER et KRAFT (1965) avaient pris un modèle plus élaboré, comportant des forces de frottement compatibles avec la théorie de Chapman-Gouy, mais schématisées par éléments linéaires : à partir de la paroi, elles sont infinies jusqu'à la distance a, nulles à partir de b, et varient linéairement de a à b, passant de f à O. Mais on ne peut conduire le calcul numérique à son terme que sur des valeurs numériques précises de a, b et du diamètre. Des abaques permettent de préciser certains cas. Le seuil de gradient serait un cas particulier.

Ces modèles schématiques ne sont que difficilement applicables à des ensembles de capillaires non cylindriques et de diamètres variés. Nous avons représenté sur la figure 11 les distributions de vitesse dans les canalicules — pour ces auteurs — en y ajoutant notre hypothèse simplificatrice et plus globale de la couche d'eau semi-cristalline adsorbée.

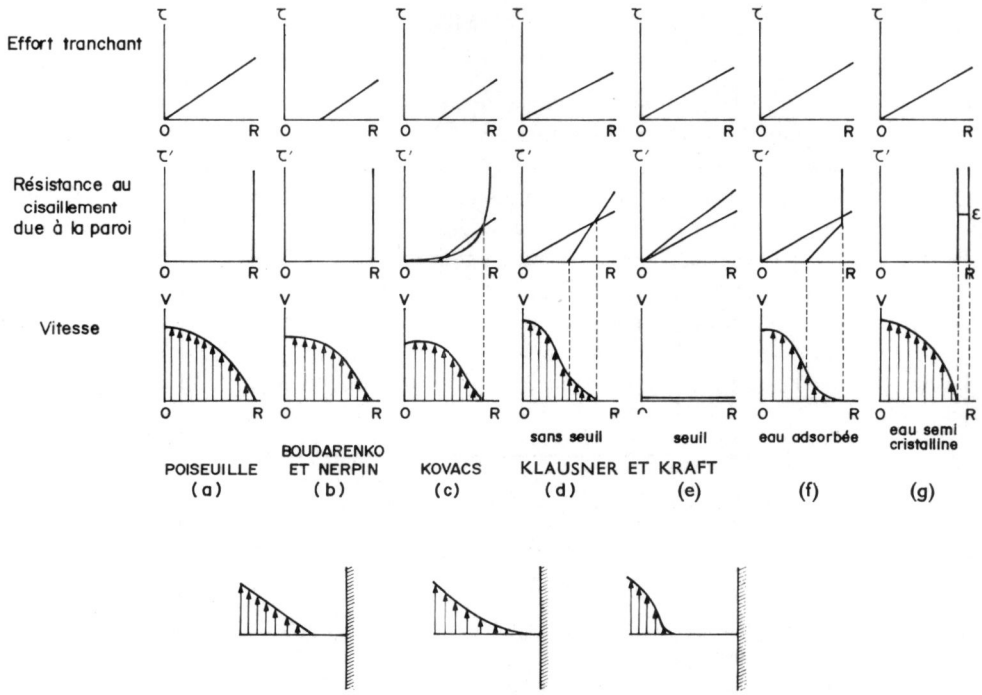


FIG. 11. — *Distribution des vitesses et des efforts tranchants pour diverses hypothèses d'écoulement dans un capillaire*

4. 4. — *Hypothèse d'une couche semi-cristalline d'épaisseur variable*

Nos essais montrent que la perméabilité intrinsèque k dépend essentiellement de deux paramètres : la porosité P et le gradient hydraulique ou la vitesse de filtration V. Nous disposons d'une formule généralement admise, celle de Carman-Kozeny, qui prend en compte P, et qui cadre mieux avec nos résultats en introduisant un facteur de rétention a. Nous l'avons écrite sous la forme :

$$k = k_o \frac{[P - a(1-P)]^3}{(1-P)^2}$$

où k_o ne dépend que du milieu (géométrie des conduits et surface spécifique) et du liquide filtrant, donc pas de P et V ; sa valeur une fois fixée, graphiquement par exemple, il correspondra à chaque valeur de k une de a. Cette méthode de calcul concentre sur a toutes les erreurs expérimentales, donnant des variations désordonnées que nous avons atténuées en prenant pour a les valeurs moyennes pour chaque gradient. Nous les avons représentées sur la figure 12 avec des échelles logarithmiques. Il est alors évident que a est fonction de P et de V. Pour la déterminer, on peut faire appel à l'ordinateur, et nous l'avons fait. Mais nous préférons suivre ici la voie traditionnelle où la réalité physique transparaît.

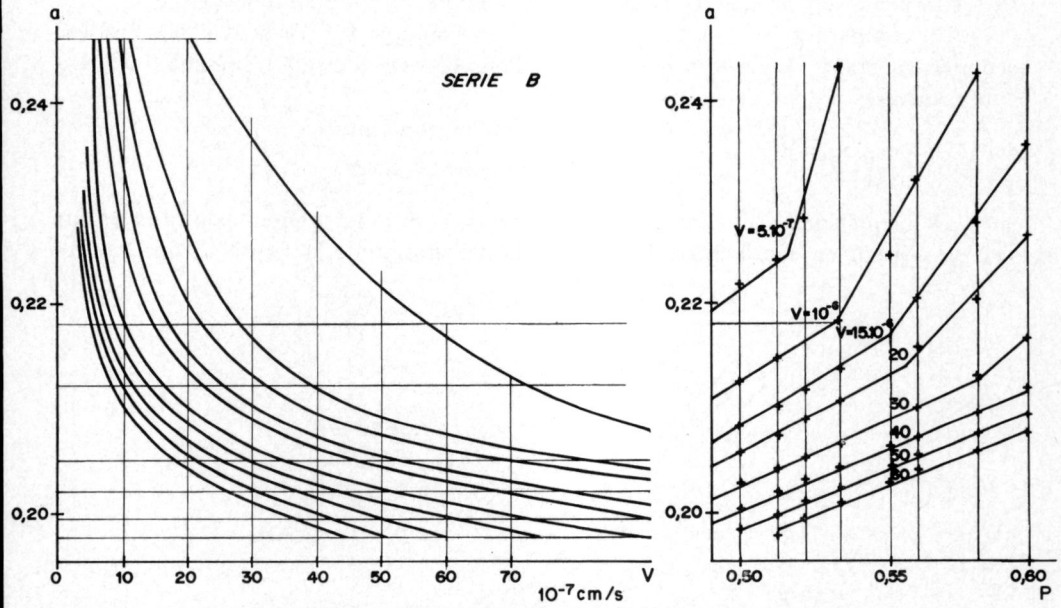


FIG. 12. *Variation du facteur de rétention en fonction de la vitesse pour diverses porosités, et en fonction de la porosité pour diverses vitesses de filtration*

Posons comme hypothèse que la variation d'épaisseur de la couche d'eau adsorbée avec chacun de ces deux paramètres est proportionnelle à cette épaisseur. Traduit en fonction du facteur de rétention a, son accroissement est ∂a tel que :

$$\left(-\frac{\partial a}{\partial V}\right)_P = b(P) \cdot a \qquad \left(\frac{\partial a}{\partial P}\right)_V = c(V) \cdot a$$

Pour rester dans le cadre adimensionnel, il eut été préférable de garder J (mais alors les graphes ne sont pas significatifs), ou bien de ramener également les vitesses de filtration à une vitesse de référence (mais le problème n'en présente pas).

De ce fait, b n'est fonction que de P et homogène à l'inverse d'une vitesse et c que de V et sans dimension. L'intégration donne :

$$a = d \cdot e^{g(P)} \cdot e^{h(P,V)} \qquad [2]$$

La détermination des fonctions d, $g(P)$, $h(P,V)$ se simplifie dans notre problème. Si nous revenons à la figure 12, le graphe de gauche, en coordonnées semi-loga-

rithmiques dans le plan (a,V) n'est pas utilisable. Par contre, celui de droite en coordonnées logarithmiques dans le plan (a,P), pour différentes valeurs de la vitesse de filtration nous donne des droites qui se cassent en un point correspondant sensiblement au gradient hydraulique 10. Ces droites sont approximativement parallèles pour chaque famille. Elles ont pour équation :

$$\log a = \alpha P + \log \beta \qquad [3]$$

ou

$$a = \beta e^{2,3\alpha P} \qquad [4]$$

α est la pente des droites, constante et β l'ordonnée à l'origine fonction de V.

En comparant les équations [2] et [4], on voit que h(P,V) peut être considéré comme constant ; β est le produit $d \cdot e^{h}$. Pour la série d'essais représentée ici, α a pour valeur :

$\alpha_1 = 0{,}56$ pour les faibles gradients ;

$\alpha_2 = 0{,}17$ pour les gradients élevés.

De l'équation [3] on tire alors les valeurs de β. Si nous prenons pour α la valeur α_2, on obtient en coordonnées logarithmiques le graphe de la figure 13 qui montre

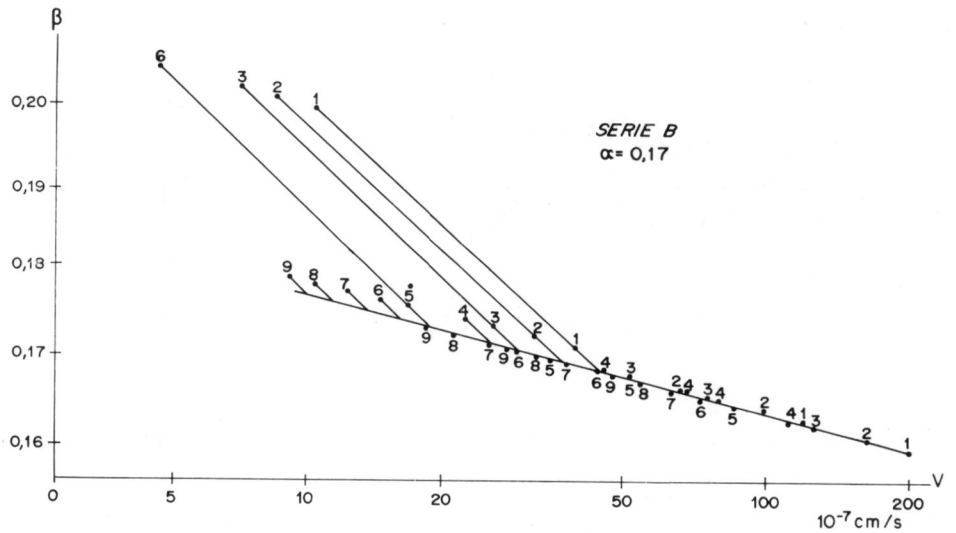


FIG. 13. — *Variation du facteur β avec la vitesse montrant l'inadéquation de la formule pour cette valeur de α aux faibles gradients*

bien que la variation est linéaire sauf pour les points correspondant aux faibles gradients. On a donc :

$$\log \beta = m \cdot \log V + \log n \qquad \text{ou} \qquad \beta = n \cdot V^{m}$$

Ici, $\beta = 0{,}11\ V^{-0,033}$; donc $a^2 = 0{,}11\ V^{-0,033} \cdot e^{0,39\ P}$

L'équation n'est pas homogène. Les vitesses sont exprimées en 10^{-7} cm/s. Elles n'interviennent qu'à une puissance faible et nous pourrions nous contenter d'une

TABLEAU 3

Valeurs de la perméabilité géométrique K en 10^{-4} μ^2 obtenues par interpolation des valeurs mesurées ou calculées

Valeurs mesurées

Série A

J	3	10	20	30	40	50	60	70
0,617	4,60	5,06	5,09	5,13	5,16	5,19	5,24	
0,594	3,65	3,82	3,84	3,86	3,88	3,90	3,91	
0,581	2,50	2,94	3,06	3,12	3,16	3,17	3,19	
0,563	2,35	2,52	2,54	2,56	2,58	2,60	2,62	
0,552	1,87	2,12	2,18	2,20	2,22	2,24	2,26	
0,536	1,62	1,79	1,80	1,805	1,81	1,815	1,82	1,82
0,522	1,40	1,50	1,52	1,525	1,53	1,54	1,55	1,55
0,512	1,25	1,30	1,32	1,33	1,335	1,34	1,34	1,345
0,499	1,08	1,105	1,115	1,12	1,125	1,13	1,13	1,13
0,488	0,944	0,958	0,967	0,974	0,978	0,982	0,985	0,988

Valeurs calculées

Série A

P	J = 3	7	10	10	20	30	40	50	60
0,617	4,62	4,81	4,89	4,95	5,00	5,03	5,05	5,07	5,08
0,494	3,46	3,61	3,68	3,69	3,73	3,76	3,78	3,79	3,80
0,581	2,93	3,09	3,14	3,14	3,18	3,20	3,22	3,23	3,24
0,563	2,36	2,48	2,54	2,54	2,57	2,59	2,61	2,62	2,63
0,552	2,03	2,15	2,20	2,20	2,23	2,25	2,26	2,27	2,28
0,536	1,65	1,75	1,80	1,80	1,82	1,84	1,85	1,86	1,87
0,522	1,38	1,47	1,52	1,52	1,53	1,55	1,56	1,57	1,57
0,512	1,20	1,29	1,32	1,32	1,34	1,36	1,37	1,37	1,38
0,499	1,01	1,09	1,13	1,11	1,14	1,15	1,15	1,16	1,17
0,488	0,87	0,93	0,96	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01

Nota : Pour le gradient 10, la perméabilité a été calculée par les deux formules.

valeur approchée, par exemple celle obtenue en 3. 3. Ce qui permet d'écrire la vitesse en cm/s en fonction du gradient :

$$V = K \cdot J = 1{,}91 \cdot 10^{-10} \cdot e^{12{,}8\,P} \cdot J$$

d'où la valeur approchée :

$$a_2 = 0{,}23 \cdot e^{-0{,}03\,P} \cdot J^{-0{,}033}$$

On voit que l'exponentielle varie entre 0,984 5 et 0,982 5. En prenant sa valeur moyenne, on peut écrire :

$$a_2 = 0{,}226\ J^{-1{,}30}$$

La même méthode aurait donné pour les faibles gradients :

$$a_1 = 0{,}66\ J^{-1{,}10}$$

Portant ces valeurs dans l'équation [1], on obtient des valeurs calculées de k qu'on peut comparer aux valeurs expérimentales. L'écart type résiduel est alors 0,017 2 (tabl. 3).

4. 5. — *Conséquences*

La possibilité effective de calcul de la perméabilité d'un kaolin nous paraît pour le moment secondaire devant la mise en évidence d'une double valeur du facteur de rétention. Nous rapprocherons ce résultat de la notion de couche d'eau adsorbée dont on peut admettre que les molécules qui la composent sont d'autant plus liées qu'elles sont plus proches de la paroi. On conçoit aisément que la plus faible valeur de a, relative aux gradients élevés, corresponde à l'eau fortement adsorbée, tandis qu'aux faibles gradients (donc aux faibles vitesses de filtration), les efforts tranchants dans le liquide sont trop faibles pour arracher même les couches moins bien retenues. Il n'est pas nécessaire d'introduire d'autre hypothèse concernant l'écoulement de l'eau que celle de la viscosité d'un liquide newtonien, et de l'existence généralement admise d'une couche d'eau adsorbée.

Il est d'ailleurs intéressant de calculer l'épaisseur ε de cette couche supposée uniforme, à partir de la formule établie :

$$\varepsilon\sigma = a\ (1 - P)$$

où σ représente la surface par unité de volume du sol. Si s est la surface spécifique par unité de masse, ρ la masse spécifique de l'argile,

$$\sigma = s \cdot \rho\ (1 - P)$$

et par conséquent :

$$\varepsilon\,\sigma = \varepsilon \cdot s\,\rho\ (1 - P) = a\ (1 - P)$$

et

$$\varepsilon = \frac{a}{s \cdot \rho}$$

Pour notre kaolin, $s = 13 \cdot 10^4$ cm²/g $\qquad \rho = 2{,}75$

$$\varepsilon = \frac{0{,}2 \cdot 10^{-4}}{13 \times 2{,}75} = 60 \cdot 10^{-8}\ \text{cm} = 60\ \text{Å}$$

5. — CONCLUSION

Dans le cadre expérimental qui est le nôtre, c'est-à-dire avec de petits échantillons d'argile remaniée, soumis à une circulation d'eau distillée, nous sommes loin des conditions naturelles. Ici, pas de fissure, pas de sels dissous dans l'eau : on s'est attaché au modèle microscopique, pensant que c'est une bonne introduction au modèle macroscopique : la recherche au laboratoire doit faciliter l'interprétation de ce qui se passe sur le terrain. Compte tenu de ces restrictions, nous pouvons affirmer :

— que la loi de Darcy ne semble pas être exactement applicable à la filtration de l'eau dans le kaolin, aux faibles gradients surtout, pour lesquels la perméabilité diminue fortement.

— que, cependant, aucun seuil de gradient n'a pu être mis en évidence.

Le modèle adopté n'est pas original, mais il n'avait jamais été poussé à ce point. Nous avons, en effet, pu mettre en évidence par les méthodes de l'hydraulique l'existence possible d'une couche d'eau adsorbée, d'une épaisseur compatible avec celles obtenues par d'autres méthodes, et différencier, dans cette couche, des zones plus ou moins fortement liées.

Reçu pour publication en juin 1973.

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis de remercier ici Monsieur le Professeur Cl. THIRRIOT, qui a dirigé la thèse dont ces résultats sont un aspect.

SUMMARY

THE FILTRATION FLOW OF PURE WATER THROUGH KAOLIN AND DARCY'S LAW

Water permeability of clays is a contraversial subject. Is it constant or variable ? Does a hydraulic gradient threshold exist below which clay becomes impermeable ? Theories and experimenters can be found to justify every assertion.

Our tests on kaolin provided neither confirmation of the existence of such a threshold nor proof of permeability independent of the hydraulic gradient, since permeability decreases rapidly with the gradient when it is low.

A relationship was established between permeability, the porosity of a koalin and the motor hydraulic gradient.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE FILTRATIONSSTRÖMUNG IM KAOLIN UND DAS GESETZ VON DARCY

Die Wasserdurchlässigkeit der Tonerden ist umstritten. Ist sie beständig oder veränderlich ? Gibt es einen Schwellwert für das hydraulische Gefälle, unter dem der Ton undurchlässig wird ? Man findet Theorien und Forscher, die die eine oder die andere Behauptung vertreten.

Unsere Kaolinuntersuchungen erlauben es uns weder, das Vorhandensein einer solchen Schwelle zu bekräftigen, noch die Auffassung zu vertreten, dass die Durchlässigkeit unabhängig vom hydraulischen Gefälle ist, da sie sehr rasch bei schwachem Gefälle abnimmt.

Es war möglich, einen Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit, der Porosität des Kaolins und dem motorischen hydraulischen Gefälle zu finden.

РЕЗЮМЕ

Ж. ХАБИБ.

Фильтрационный сток в каолине и закон Дарси.

Проницаемость глин — вопрос спорный. Постоянна-ли она, или-бывает разной ? Существует-ли какой-то порог водного градиента, ниже которого глина становится непроницаемой? Есть много разных теорий, и существует много исследователей поддерживающих одно из этих двух мнений.

Опыты автора, проведенные на каолине не позволяют подтвердить существование указанного порога, также как и допустить проницаемость не зависящую от водного градиента, ибо при небольших величинах градиента проницаемость каолина быстро уменьшается.

Но он установил соотношение между проницаемостью, порозностью, исследуемой глины и водным градиентом, представляющим движущую силу.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BONDARENKO N., NERPIN S., 1964. Rheological Properties of Water in Porous Media. *Symposium Rilem*, Paris.

HABIB J., 1953. Transformation de l'œdomètre en vue de la mesure de la perméabilité. *C. R. Acad. Sci.*, **237**, 1547-1548.

HABIB J., HUGUES L., 1953. Sur la détermination du facteur de rétention pour l'eau des argiles du type Kaolin. *C. R. Acad. Sci.* **237**, 1766-1768.

HABIB J., THIRRIOT C., 1969. Écarts à la loi de Darcy pour les écoulements de l'eau à faible vitesse dans les argiles. *XIIIe Congrès de l'A. I. R. H.*, Thème D., Kyoto.

HABIB J., 1971. *L'écoulement de filtration de l'eau pure à travers les argiles et la loi de Darcy.* Thèse de Doctorat ès-Sciences. Université Paul Sabatier, Toulouse.

HADAS A., 1964. Deviation from Darcy's Law for the Flow of Water in Unsaturated Soils. *Isr. J. Agr. Res.*, **14** (4), 159-168.

HUGUES L., 1948. Étude théorique et expérimentale sur les propriétés hydrodynamiques d'un sol pulvérulent et les lois de la filtration. *Ann. Génie Rural*, **70**, 147 p.

KLAUSNER Y., KRAFT R. 1965. Non-Poiseuille Flow with Axial Forces. *Isr. J. Techn.* **3** (3), 152-159.

KLAUSNER Y., KRAFT S. R., 1965-1966. Saturated Flow through Porous Media with Active Surfaces. *Negev Inst. Dept. of Mec. of Soils.* I. Flow through Capillaries with Wall Forces, **3**, 1965. II. Capillary Model for Non-Darcy Flow, **4**, 1966.

KOVACS G., 1969. Seepage Law for Microseepage. *XIIIe Congrès de l'A. I. R. H.*, Thème D, Kyoto.

KUTILEK M., 1964. The Filtration of Water in Soils in the Region of Laminar Flow. 8e *Congrès intern. I. S. S. S.*, II. 45-52.

KUTILEK M., 1965. Influence de l'interface sur la filtration de l'eau dans les sols. *Sci. Sol*, **1**, 3-14.

KUTILEK M., 1968. Non-Darcian Flow of Water in Soils (Laminar Region). *Intern. Soil Water Symposium*, Haiffa, V. 30-40.

LAMBE T. W., 1954. The Permeability of Fine Grained Soils. *Symp. on Perm. of soils*, Chicago. *Am. Soc. Testing Materials*, **163**, 56-67.

LUTZ J. F., KEMPER W. D., 1959. Intrinsic Permeability of Clays as Affected by Clay-Water Interaction. *Soil Sci.*, **88** (2), 83-90.

MICHAELS A. S., LIN C. S., 1954. The Permeability of Kaolinite to Various Fluids. *Industr. engng. Chem.*, **46**, 1239-1246.

MILLER R. J., LOW P. F., 1963. Threshold Gradient for Water Flow in Clay System. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27** (6), 605-609.

MILLER R. J., OVERMAN A. R., PEVERLY J. H., 1969. The Absence of Threshold Gradient in Clay-Water System. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **33** (2), 183-187.

MITCHELLEJ K., HOOPER D. R., CAMPANELLA R. G., 1965. Permeability of Compacted Clays. *J. Soil Mec. Found. Div. Proc. A. S. C. E.*, 41-65.

OLSEN H. W., 1965. Deviation from Darcy's Law in Saturated Clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **29** (2), 135-140.

OLSEN H. W., 1966. Darcy's Law in saturated Kaolinite. *Water Resources Res.*, **2**, 287-295.

SWARTZENDRUBER D., 1962. Modifications of Darcy's Law for the Fow of Water in Soils. *Soil Sci.*, **93** (1), 22-29.

SWARTZENDRUBER D., 1963. Non Darcian Behaviour and the Flow of Water in Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27** (3), 491-495.

SWARTZENDRUBER D., 1968. The Applicability of Darcy's Law. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **32** (1), 11-18.

THIRRIOT C., 1969. Régimes d'écoulement et lois de pertes de charge en milieu poreux. *XIII*e Congrès *de l'A. I. R. H.*, thème D., Kyoto.

THIRRIOT C., HABIB J., 1970. Étude expérimentale des écoulements à très faible nombre de Reynolds dans les Argiles. *Sci. Agron.* Rennes (Bulletin de l'E. N. S. A. de Rennes).

Ann. agron., 1973, **24** (6), 639-650.

SUR LE PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT DES DRAINS EN SOL LESSIVÉ HYDROMORPHE

Suzanne MÉRIAUX (1)
avec la collaboration technique de Josette GONTHIER, G. LAVIELLE et C. PERREY

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches, I. N. R. A.,
21000 Dijon

RÉSUMÉ

Le mécanisme du mouvement de l'eau durant l'écoulement des drains dans un sol lessivé a été étudié par marquage au chlore. Le chlore apporté ne descend jamais en dessous de 40 cm. Il est éliminé par les drains selon un mouvement essentiellement latéral qui se produit avant la réhumectation des couches profondes. Celle-ci a lieu à partir de l'eau préexistante dans les horizons supérieurs du sol par un mouvement vertical indépendant du drainage. Le fonctionnement des drains en planches enterrées, tel qu'il a été démontré, pose le problème de la durée de leur efficacité.

INTRODUCTION

Dans deux notes antérieures (MÉRIAUX *et al.*, 1971-1972), nous avions exposé les premiers résultats de trois années d'étude comparée des drains et des planches en sol lessivé hydromorphe à la Station Hydrologique de Montberthault (Côte-d'Or). Ce sol est caractérisé par deux niveaux imperméables, l'un en surface, résultant de la texture limoneuse de l'horizon A génératrice de battance, l'autre, aux environs de 50 cm de profondeur, lié à l'horizon Bt.

Sur ce terrain en légère pente, traité en culture uniforme selon une rotation classique, deux systèmes de drainage ont été mis en place : l'un, de surface, dans la partie la plus plane du champ par modelage en grandes planches, l'autre, en profondeur, réalisé au moyen de drains en poterie.

(1) Adresse actuelle : Compagnie Nationale d'Aménagement du Bas-Rhône et du Languedoc 685, route d'Arles, 30001 Nîmes.

Après trois années de mesures, nous constations que l'évacuation de l'eau par les drains était environ le triple de celle des planches. Par ailleurs, les données des tensiographes nous montraient que, en sol non réhumecté, les drains coulaient sans que la tension à la profondeur correspondante ait varié.

Ces constatations nous ont incités à étudier le mécanisme de fonctionnement des drains ; transit de l'eau à travers la masse du sol ou écoulement sur une couche peu profonde jouant le rôle d'imperméable. Une telle étude était d'autant plus nécessaire que les mesures de vitesse d'infiltration effectuées soit par la méthode de Muntz, soit par la méthode de Porchet conduisaient à des valeurs très faibles, donnant à penser que le sol était pratiquement imperméable, donc ne pouvait permettre le fonctionnement d'un drainage intense.

I. — PRINCIPE, CONDITIONS DE L'EXPÉRIENCE ET MÉTHODES

1. 1. — *Principe*

Il consiste à suivre le mouvement de l'eau dans le sol à l'aide d'un traceur, pendant une période de drainage effectif. Le traceur employé est le chlore.

1. 2. — *Conditions générales de milieu*

Rappelons quelques caractéristiques essentielles de l'essai comparatif de drainage à l'intérieur duquel est située l'expérience de marquage et dont le plan est donné sur la figure 1.

	Argile (%)	Limon 2-50 μ (%)	Porosité totale (%)	Capacité de rétention FÉODOROFF (1969) (%)	K. Porchet (ROEDERER 1956) (m/s)	K. Muntz (verticale) (cm/h)
Horizon A	16	60	44	26	$2{,}7\ 10^{-7}$	1
Horizon B*t*	40	40	37	31	$1{,}5\ 10^{-7}$	

Topographie :

Pente moyenne : 1 p. 100.
Pentes extrêmes : ≃ 0 et 2 p. 100.

Techniques de drainage :

Planches : 30 mètres de large, 1 mètre de dénivellation.
Drains enterrés : 0,70 mètre de profondeur, 10 mètres d'écartement, 1 p. 100 de pente, posés manuellement en files obliques par rapport à la pente du terrain, dans une tranchée de 0,90 mètre de large creusée à la pelle.

1. 3. — *Protocole de l'expérience de marquage*

Sur deux parcelles de 10 m² (longueur = 10 mètres, largeur = 1 mètre) allant d'un drain au suivant (fig. 1) et situées dans une partie du terrain où la pente est inférieure à 1 p. 100, une solution de KCl (160 g/l) a été répandue uniformément à raison de 20 litres par parcelle le 10 janvier 1972, soit un apport de 1,520 kg de Cl^- par parcelle.

A des intervalles d'une semaine, pouvant atteindre 2 semaines en l'absence de précipitations, des prélèvements de terre étaient effectués dans quatre sous-parcelles, à une distance de 2 mètres les uns des autres, perpendiculairement aux drains, le prélèvement N° 1 se situant selon les dates à 0,30, 0,50 ou 0,70 mètre de l'un des drains (ce décalage des points de prélèvements avait pour

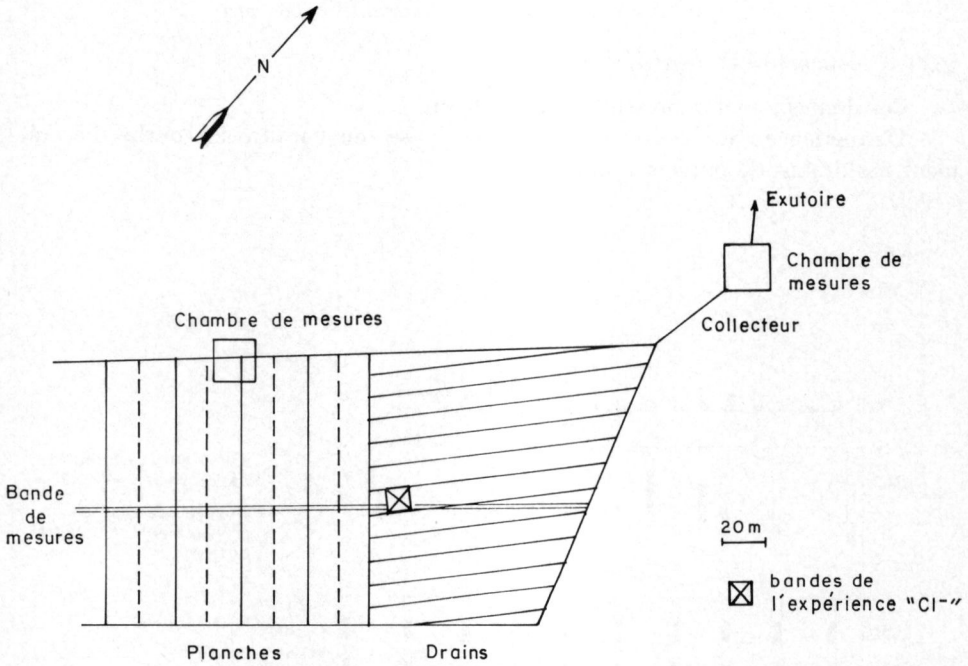


FIG. 1. — *Plan de situation de l'expérience*

but d'éviter les infiltrations parasites à partir des forages précédents). Les prélèvements sur 100 cm de profondeur étaient réalisés par tranches de 20 cm d'épaisseur (ce découpage s'accorde avec la morphologie du profil). Un prélèvement témoin avait lieu dans les mêmes conditions sur une bande parallèle aux deux parcelles expérimentales.

1. 4. — *Dosage du chlore*

Le chlore est extrait par l'eau et dosé par argentimétrie (méthode de Charpentier-Volhard) précision ± 0,01 p. 1 000. Les résultats sont exprimés en Cl^- p. 1 000.

1. 5. — *Mesures hydriques*

Pour l'ensemble du périmètre drainé (1, 19 ha) dans lequel sont situées les parcelles expérimentales de 10 m², nous disposons :

— de la pluviométrie enregistrée hebdomadairement (pluviographe Lambrecht),

— des débits des drains enregistrés hebdomadairement (limnigraphe OTT relié à un bac déversoir),

— des profils hydriques bi-mensuels par la méthode neutronique (étalonnage selon l'équation de COUCHAT, 1967), entre les drains (ED) et sur les drains (SD). Les mesures sont réalisées tous les 10 cm, jusqu à 2,25 mètres ;

— des niveaux piézométriques hebdomadaires : pour chacune des positions ED et SD, batterie de 3 piézomètres aux profondeurs 40 cm, 70 cm et 100 cm.

II. — RÉSULTATS

2. 1. — *Conditions hydriques durant l'expérience*

2. 11. *Pluviométrie et drainage.*

Ces données sont représentées sur la figure 2.

L'expérience concerne une période pluvieuse qui encadre la courbe d'écoulement des drains, de janvier à mars.

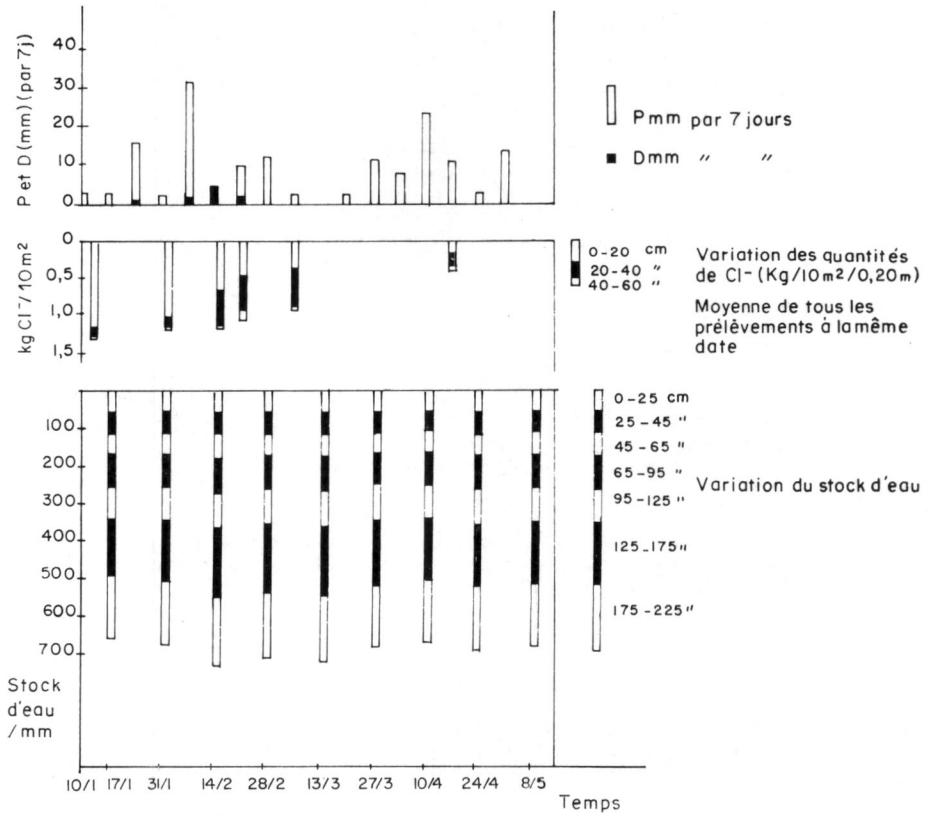


FIG. 2. — *Évolution au cours du temps des précipitations* (P), *du drainage* (D), *du stock d'eau du sol par couche et des quantités de chlore par couche*

2. 12. *Variation du stock d'eau du sol et de la nappe.*

Les profils hydriques sont représentés, pour la situation entre-drains (ED), sur la figure 3, en variations du stock d'eau par couche de sol (nous estimons que la précision est de l'ordre de 0,5 point d'humidité volumique par couche de 10 cm).

Le maximum d'humidité du sol est atteint le 14-2, date à laquelle la nappe s'établit sur les drains à 65 cm de la surface, pour 5 semaines (aucune nappe n'a été observée entre les drains).

Le tableau 1 indique la variation de réserve en eau des différentes couches du sol au cours de la période de réhumectation qui a précédé l'apport de traceur (25-10-71 = dernier profil sec) ainsi que lors des deux phases de drainage : période des débits croissants jusqu'au maximum, période des débits décroissants jusqu'au tarissement complet.

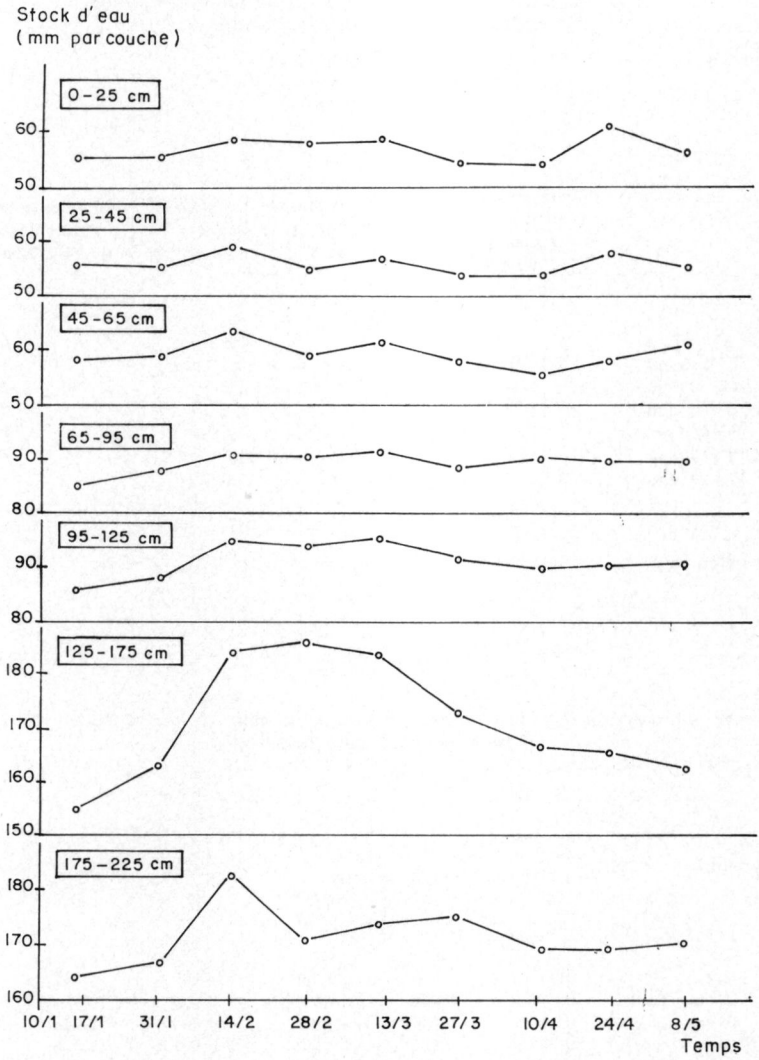


FIG. 3. — *Variation du stock d'eau* (mm) *par couche au cours du temps* (entre-drains)

2. 2. — *Variation moyenne de la teneur en chlore par couche au cours du temps* (tabl. 2)

D'après ce tableau, il apparaît que le chlore ne descend jamais massivement en dessous de 40 cm. Il n'y pénètre de façon significative, mais très modérée, qu'au moment des plus forts écoulements.

Signalons que la teneur en chlore avant épandage se situe, comme celle des parcelles témoins, entre 0,01 et 0,03 p. 1 000.

TABLEAU 1

Variations de la réserve en eau du sol (position entre drains) *pendant la réhumectation et le drainage*

(en mm d'eau)
+ : gain d'eau
— : perte d'eau

	Période de réhumectation ayant précédé l'apport du traceur (du 25-10-71 au 17-1-72)	Période de drainage en débits croissants (du 31-1-72 au 14-2-72)	Période de drainage en débits décroissants (du 14-2-72 au 13-3-72)
0- 25 cm	+ 27,9	+ 3,1	— 0,6
25- 45 cm	+ 17,4	+ 3,7	— 1,8
45- 65 cm	+ 8,1	+ 4,3	— 1,8
65- 95 cm	+ 4,3	+ 6,2	— 3,1
95-125 cm	— 1,2	+ 7,4	0
125-175 cm	+ 3,1	+ 21,1	0
175-225 cm	— 0,6	+ 15,5	— 8,7
Total : 0-225 cm	+ 59,0	+ 61,3	— 16,0

TABLEAU 2

Teneurs moyennes en Cl^- (en p. 1 000) *par couche au cours du temps* (témoin déduit) *et quantité de* Cl^- *dans la parcelle*

Profondeur	Date étape					
	13-1-72 A	1-2-72 B	15-2-72 C	21-2-72 D	6-3-72 D′	17-4-72 E
0- 20 cm	0,387	0,354	0,230	0,162	0,117	0,057
20- 40 cm	0,046	0,038	0,148	0,152	0,171	0,063
40- 60 cm	0,014	0,014	0,022	0,043	0,018	0,019
60- 80 cm	0,002	0,004	0,004	0,008	0,016	0,022
80-100 cm	0	0	0	0	0	0,008
Quantité de Cl^- (en kg) dans la parcelle (surface = 10 m² ; profondeur = 1 m) Précision : ± 0,150 kg	1,300	1,180	1,185	1,067	0,922	0,416

2. 3. — *Variation de la teneur en chlore dans l'espace et dans le temps*

La figure 4 représente la teneur en chlore en fonction de la distance du drain et de la profondeur pour les 5 dates que nous avons retenues comme étapes principales (étapes A à E). Ces étapes ont une valeur ponctuelle dans le temps et ne représentent que des points sur la courbe d'évolution du chlore dans l'espace et dans le temps.

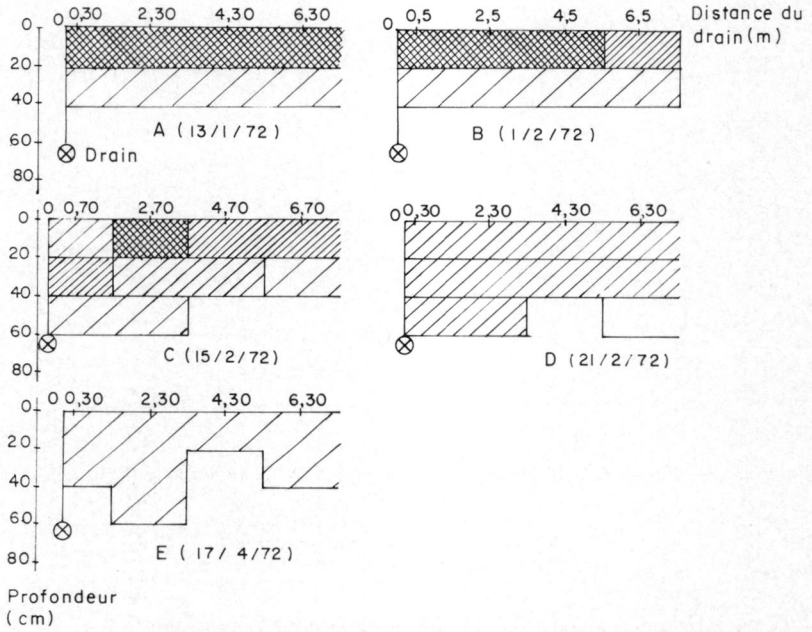


FIG. 4. — *Distribution du chlore dans un plan perpendiculaire au drain*

$Cl^- > 0{,}300$ p. 1000.

0,200 p. 1 000 $< Cl^- <$ 0,300 p. 1 000.

0,100 p. 1 000 $< Cl^- <$ 0,200 p. 1 000.

0,030 p. 1 000 $< Cl^- <$ 0,100 p. 1 000.

$< Cl^- <$ 0,100 p. 1 000.

2. 4. — *Variation de la quantité de chlore dans le sol au cours du temps*

A partir des teneurs moyennes nettes (témoin déduit) en chlore par couche et la densité apparente de chaque couche, nous avons calculé la quantité de chlore présente dans la parcelle aux différentes dates de prélèvement. La précision de $\pm$ 0,150 kg est calculée à partir de la précision du dosage de Cl^- (+ 0,001 p. 1 000) et ne tient pas compte de l'erreur sur la densité apparente. Il est à noter en outre que des pertes de chlore ont pu se produire en dehors du parallélipipède étudié dont la largeur est faible (1 m).

La figure 5 représente en fonction des précipitations et du drainage cumulés :

— la variation de la quantité de chlore dans le profil de 0 à 60 cm (nous avons négligé les couches de 60 à 100 cm où le chlore n'apparaît que très peu) ;

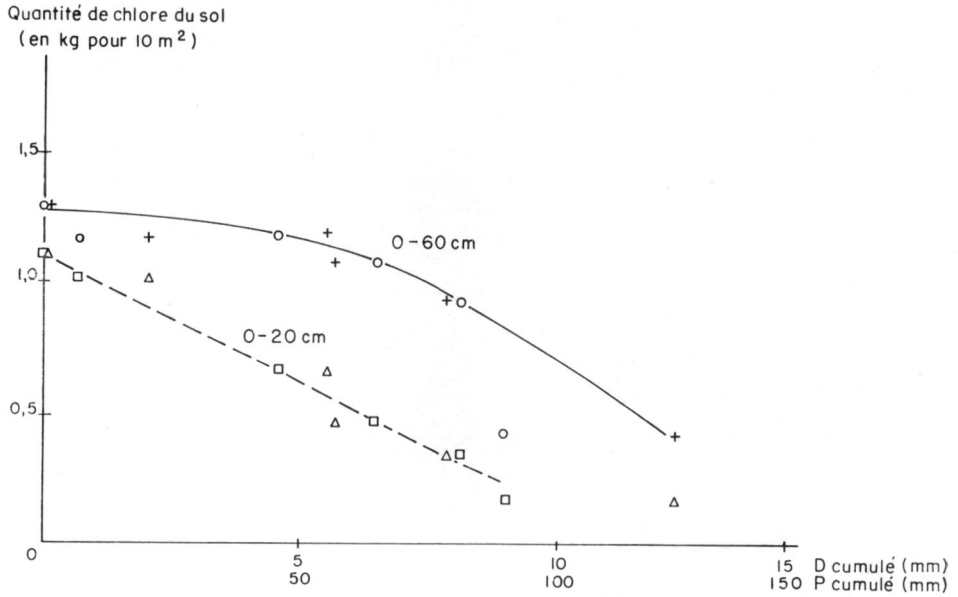


FIG. 5. — *Variation du chlore en fonction des pluies* (Pc) *et du drainage* (Dc) *cumulés*

+ Cl de 0 à 60 cm en fonction de Pc
○ Cl de 0 à 60 cm en fonction de Dc
△ Cl de 0 à 20 cm en fonction de Pc
□ Cl de 0 à 20 cm en fonction de Dc

— la variation de la quantité de chlore de la couche 0-20 cm.

Cette figure montre une relation inverse (décroissance linéaire dans le cas de la couche 0-20 cm) entre la quantité de chlore et les précipitations ainsi que le drainage. Notons que, pour chacune des couches de sol considérées, les points représentatifs du drainage et des précipitations sont alignés sur une même courbe avec une échelle d'abcisses dans le rapport de 10 à 1. Ceci signifie que, pour la période envisagée, le drainage cumulé représente le dixième des précipitations cumulées.

III. — DISCUSSION

3. 1. — *Mécanisme du mouvement de l'eau marquée vers les drains*

La figure 4 jointe aux données hydriques permet de proposer le schéma interprétatif suivant :

Étape A (13-1-72) : c'est le stade initial, 3e jour à partir de l'apport de la solution, après 1,9 mm de pluie, sans drainage.

Étape B (1-2-72) : 22e jour à dater de l'apport. Pluie cumulée (Pc) = 20,7 mm. Drainage cumulé (Dc) = 0,7 mm.

Le chlore est resté dans la couche 0-20 cm qui, seule, s'est réhumectée. On constate une variation latérale au sein de cette couche comme l'atteste à cette date la croissance quasi linéaire de la teneur en chlore lorsque on se rapproche du drain (fig. 6). Il est possible que l'eau circule dans cette couche à la faveur d'une légère semelle de travail du sol.

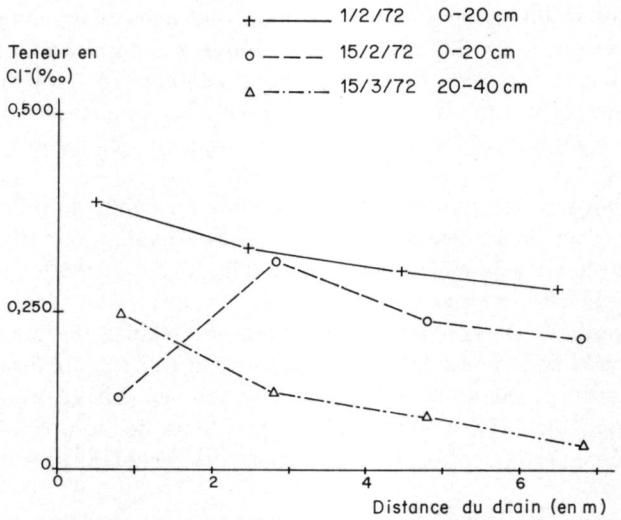


FIG. 6. — *Variation de la teneur en chlore avec la distance du drain*

Étape C (15-2-72) : 36e jour, Pc = 56,1 mm, Dc = 4,7 mm.

Le même processus que précédemment a lieu dans la couche 0-20 cm. Toutefois, on constate qu'à proximité du drain, la teneur en chlore a baissé (fig. 6).

On observe en outre un enrichissement de la couche 20-40 cm au sein de laquelle se produit la même variation latérale vers le drain (fig. 6).

Étape D (21-2-72) : 42e jour, Pc = 56,9 mm, Dc = 6,6 mm.

Depuis l'étape précédente, le drainage a diminué d'intensité et une partie du chlore est éliminée. Le processus dominant est ici l'enrichissement vertical : teneurs voisines des couches 0-20 et 20-40 cm.

Un peu plus tard (étape D′ non représentée sur la figure : 6-3-72 : 56e jour, Pc = 78,1 mm, Dc = 8,2 mm), on constate un enrichissement de la couche 20-40 cm (0,171 p. 1 000) sans différenciation latérale dans aucune des couches.

Étape E (17-4-72) : 98e jour, Pc = 124,5 mm, Dc = 9,0 mm.

Le drainage a cessé le 13-3 et le phénomène d'évaporation intervient dans l'utilisation de l'eau des précipitations. Les teneurs en chlore sont devenues faibles.

Cette expérience en sol lessivé laisse donc supposer un mouvement de l'eau dans des couches très superficielles en direction des drains.

La circulation de l'eau dans la couche arable vers les drains a déjà été signalée par FUKUDA (1967) mais il s'agissait d'un sol argileux. Récemment, CROS et JACQUIN (1972) ont formulé cette hypothèse pour expliquer le fonctionnement du drainage dans les « qélosols » de Lorraine.

3. 2. — *La réhumectation profonde*

L'examen des variations hydriques du sol (fig. 3, tabl. 1) fait apparaître des modifications d'humidité entre 45 et 225 cm, zone non affectée par les mouvements de l'eau marquée.

D'après les résultats de l'étude hydrique que nous poursuivons depuis 1968, nous constatons que le profil entier ne s'est trouvé à la capacité de rétention que le 14-2, au moment du drainage maximum. Pour atteindre cet état durant la période de drainage croissant (du 31-1 au 14-2), la couche 45-225 cm s'est enrichie de 54,5 mm ; elle n'a diminué que de 13,6 mm en drainage décroissant du 14-2 au 13-3 (tabl. 1).

Pour expliquer cette réhumectation profonde du début de février, non affectée par le traceur placé en surface le 10 janvier, nous sommes conduits à supposer que l'eau ainsi gagnée en profondeur préexistait dans le sol avant les précipitations et a simplement été déplacée par « effet piston ».

Cette hypothèse est confirmée par l'étude du bilan hydrique de chacune des couches durant la période du 25-10-71 au 17-1-72 (tabl. 1) : il existe au moment de l'apport du traceur, dans les couches de 0 à 45 cm qui ont gagné 45,3 mm depuis le 25-10-71, un stock d'eau suffisant, compte tenu de la précision des mesures hydriques, pour permettre la réhumectation des couches sous-jacentes jusqu'à 2,25 mètres.

Cette interprétation est d'ailleurs conforme aux conclusions de FÉODOROFF et YARON (1967) qui, après marquage de l'eau, constatent que, pour des intensités d'arrosage faibles (6 mm/h) et voisines des nôtres (intensité maximum de 8,4 mm/h) « tout se passe comme si l'eau d'apport remplaçait progressivement l'eau préexistante en la poussant devant elle ».

De plus, nos résultats ne sont pas en désaccord avec ceux de CLOUET (1970-1971) bien que cet auteur, en raison de l'intensité élevée des précipitations (96 mm/h), ait obtenu en surimposition à « l'effet piston » un certain mélange de la solution initiale et de la solution apportée, mélange dû au phénomène de « dispersion hydrodynamique ».

3. 3. — *Synthèse des mouvements de l'eau dans le sol de la parcelle drainée*

Les manipulations des deux auteurs cités ont été conduites en laboratoire, dans des tubes, avec un seul mouvement possible de l'eau en direction verticale.

Dans notre expérience *in situ*, le mouvement de l'eau peut se produire à la fois verticalement et latéralement.

On pouvait penser que l'eau ne se dirigerait vers les drains qu'après réhumectation du sol jusqu'à leur profondeur. Or, nos résultats montrent que les drains coulent avant reconstitution de la réserve à ce niveau et que le chlore évolue essentiellement dans la couche 0-40 cm, mettant en évidence non seulement la co-existence des deux mouvements, mais la priorité chronologique du mouvement latéral.

CONCLUSION

L'étude du mécanisme du mouvement de l'eau durant l'écoulement des drains, réalisée par marquage au chlore, nous permet de dégager l'allure générale du phénomène : le chlore se déplace de l'inter-drain vers le drain à travers une couche d'environ 40 cm d'épaisseur. En effet, le centre de la zone située entre les drains s'appauvrit rapidement, alors qu'au-dessus des drains, on observe un enrichissement en chlore qui, avec le temps, se déplace des couches supérieures au niveau des drains. Seules de très faibles quantités de chlore pénètrent en-dessous de 40 cm dans l'inter-drain.

Ce phénomène correspond à un fonctionnement des drains semblable à celui de planches enterrées, confirmant ainsi la très faible vitesse d'infiltration mise en évidence par nos mesures de terrain.

Il se produit toutefois, entre les couches supérieures et les couches profondes du sol, certains mouvements de l'eau non négligeables quantitativement : ils correspondent à des effets de dessèchement et de réhumectaion et non à une circulation d'eau saturante.

En définitive, ces observations posent à nouveau le problème de l'utilisation des drains en sol imperméable : s'ils fonctionnent comme des planches enterrées, leur efficacité est liée à la structure du matériau de remplissage de la tranchée et la durée de leur action dépendra des modifications de cette structure au cours du temps.

Reçu pour publication en mai 1973.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos vifs remerciements à M. Marcesse (C. E. N. de Cadarache) qui a bien voulu réaliser le travail d'étalonnage pour les sols de cette étude.

SUMMARY

FUNCTIONING PROCESS OF DRAINAGE IN HYDROMORPHIC WASHED SOIL

Chlorine marking was used to study the mechanism of water movement during drainage in washed soil. The chlorine never goes below a level of 40 cms. It is eliminated by drainage in an essentially lateral movement taking place before re-moistening of the lower layers. The lower layers are moistened by pre-existing water in the upper layers of soil by vertical movement independent of drainage. The functioning of drainage in deep beds, as was shown, raises the problem of duration of effectiveness.

ZUSAMMENFASSUNG

ÜBER DIE WIRKUNGSWEISE VON DRÄNEN IN EINEM AUSGELAUGTEN HYDROMORPHEN BODEN

Der Mechanismus der Wasserbewegung während des Abfliessens der Dräne in einem ausgelaugten Boden wurde mit Hilfe einer Chlormarkierung untersucht. Das einge führte Chlor sinkt niemals tiefer als 40 cm. Es wird von den Dränen hauptsächlich durch eine seitliche Bewe-

gung abgeführt, und zwar vor der neuerlichen Befeuchtung der tiefen Schichten. Diese geht von dem in den oberen Bodenschichten schon vorhandenen Wasser aus, in Form einer vertikalen Bewegung unabhängig von den Dränen. Die Wirkung von Dränen in Form von eingegrabenen Brettern, wie sie aufgezeigt wurde, wirft das Problem ihrer Wirksamkeitsdauer auf.

РЕЗЮМЕ

СУСАННА МЕРИО.

О процессе работы дренов в гидроморфной выщелоченной почве.

Механизм движения воды, протекающей в дренах выщелоченной почвы, изучался с помощью радиоизотопа хлора. Внесенный хлор никогда не просачивается на глубины превышающие 40 см. Эвакуируется он подпочвенным стоком к дренам, до нового увлажнения глубоких слоев почвы. Увлажнение это происходит по вертикали, независимо от дренажа, за счет влаги существовавшей раньше в высших горизонтах почвы.

Действие дренажа поверхностным стоком, таковое каким оно было показано, ставит задачу длительности его эффективности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CLOUET Y., 1970. *Dynamique comparée de l'eau et de l'azote dans un sol brun argilo-limoneux sur marne de la région de Dijon.* Thèse de doctorat de 3e Cycle, Faculté des Sciences, Dijon.

CLOUET Y., FÉODOROFF A., LIBOIS A., MÉRIAUX S., 1972. Infiltration et déplacement d'un traceur localisé dans un sol non saturé. Effet de l'humidité initiale. *Ann. agron.* **23** (4), 461-468.

COUCHAT P., 1967. Détermination de la courbe d'étalonnage de l'humidimètre à neutrons à partir de l'analyse chimique des sols. *Symposium d'Istambul. I. A. E. A.* Vienne, 67-82.

FÉODOROFF A., ARNOUX J., LECOMPTE M., 1969. Une définition du « palier » de teneur en eau. *C. R. du SPEPE,* Fontainebleau, 1-1 à 1-15.

FÉODOROFF A., YARON B., 1967. Expériences sur l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol préalablement humide. *Ann. agron.* **18** (1), 5-15.

CROS P., JACQUIN F., 1972. Expérimentation de l'École Nationale Supérieure agronomique de Nancy et du CERAFER : Ferme de la Bouzoule. *Bull. techn. Inform.*, **273-274**, 947-953.

FUKUDA H., 1967. Subdrainage in heavy soils. Pratical considerations. *International soil water symposium,* Prague, 373-383.

MÉRIAUX S., PERREY C., LAVIELLE G., 1971. Premières données sur la dynamique comparée de l'eau dans deux systèmes d'assainissement en sol lessivé hydromorphe. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 146-166.

MÉRIAUX S., PERREY C., LAVIELLE G., 1972. Étude comparée de deux systèmes d'assainissement en sol lessivé hydromorphe. *Bull. techn. Inform.*, **273-274**, 955-964.

ROEDERER P., 1956. Perméabilité des sols (Méthode Porchet). *ORSTOM*, Maroc (inédit).

Ann. agron., 1973, **24** (6), 651-677.

ÉTUDE QUANTITATIVE DE LA GRANULATON DES SOLS SOUS PRAIRIES DE GRAMINÉES

II. — Les paramètres de granulation en relation avec la constitution physique du sol et le système racinaire

BUI HUU TRI et G. MONNIER *
avec la collaboration technique de C. Cloarec et C. Jeandet

Station d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, I. N. R. A.,
78000 Versailles

* *Station d'Agronomie,*
Centre de Recherches agronomiques d'Avignon, I. N. R. A.,
84140 Montfavet

RÉSUMÉ

Les paramètres de granulation étant définis comme le taux cumulé d'éléments structuraux inférieurs à 10 mm (T_{10}), obtenus par le test à l'alcool, et leur taille moyenne φ, ce mémoire présente les relations qui existent entre ces paramètres et un certain nombre de caractéristiques (taux d'argile, rapport argile/limon A/L, capacité d'échange, taux de matières organiques MO, taux de gonflement potentiel, indice de stabilité structurale, longueur volumique L_v des racines) du système sol-racines.

L'analyse de ces relations porte sur deux aspects principaux du phénomène de granulation, à savoir le degré de développement et la finesse de l'état structural, représentés par T_{10} et φ respectivement. Les calculs de corrélation linéaire, avec ou sans transformations de variables, montrent que les relations obtenues ne sont pas les mêmes pour les deux types de structures granulaires observées.

L'élément marquant qui ressort de cette enquête est la mise en évidence du rôle considérable que jouent les matières organiques dans les divers aspects de la granulation. Par ailleurs, ce travail a permis également la confirmation d'un certain nombre d'observations qui découlent des études antérieures, notamment l'existence de deux types de structures granulaires distinctes et les hypothèses concernant la dynamique de la granulation des terres normales.

INTRODUCTION

Dans un article précédent (TRI et MONNIER, 1973), la concordance entre les résultats du test à l'alcool et les observations visuelles en ce qui concerne les différents états structuraux, nous a permis de définir les paramètres de granulation, à savoir le taux cumulé d'éléments structuraux < 10 mm (T_{10}) et la taille moyenne φ de ces derniers. Nous avons pu également montrer qu'un taux T_{10} de 30 p. 100 constitue un seuil valable de séparation entre une structure continue ($T_{10} < 30$) et une structure granulaire ($T_{10} > 30$). C'est d'ailleurs à partir de ce seuil que se manifeste l'augmentation de la porosité liée au développement de la granulation.

En poursuivant l'exploitation des résultats de l'enquête décrite dans le précédent mémoire (TRI et MONNIER, 1973), nous nous efforcerons, dans ce qui suit, de chercher les relations entre, d'une part, l'apparition, le développement et la finesse de la granulation et, d'autre part, un certain nombre de facteurs caractéristiques du système sol-racines. Nous étudierons d'abord *l'apparition et le degré de développement* de la granulation en fonction des critères qui caractérisent ce système. Nous aborderons ensuite les facteurs qui commandent *la taille des éléments structuraux* présents dans les terres granulaires. Enfin, nous essayerons de faire la part respective de ces facteurs vis-à-vis du phénomène de granulation.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

A. — *Étude des facteurs commandant l'apparition et le développement du phénomène de granulation*

Les résultats d'une étude antérieure (TRI, 1968), obtenus par voie expérimentale, ont montré que l'apparition et le développement d'une structure granulaire pouvaient résulter de l'interaction entre la texture du sol, son état structural initial, la présence d'un enracinement, son fonctionnement et le régime hydrique du sol. Aussi, avons-nous cherché s'il existait des relations entre les différents types d'états structuraux définis au moyen du test à l'alcool et le niveau de ceux de ces facteurs qui nous étaient accessibles.

1. *Étude de corrélations simples.*

Le taux cumulé d'éléments structuraux inférieurs à 10 mm, T_{10}, étant un indice d'apparition ou de développement de la structure granulaire sous prairie, notre but a été de rechercher quels sont les facteurs susceptibles d'influer sur ce paramètre en abordant d'abord le problème par des calculs de corrélation simple. En effet, les facteurs étudiés ne sont pas tous et toujours indépendants les uns des autres et certains d'entre eux auraient risqué d'être éliminés par une analyse progressive de variance qui convient mieux à une tentative de synthèse.

L'ensemble des corrélations entre T_{10} et divers facteurs de constitution ou de comportement figurent au tableau 1.

TABLEAU I

Corrélations simples mettant en évidence les facteurs liés au développement de la granulation

Variable dépendante y	Variable explicative x	Profondeur (cm)	r	Régression de y en x
T_{10}	% argile	0-6 6-12	NS NS	
T_{10}	Argile/Limon (1)	0-6 6-12	0,30* 0,24*	$y = 25{,}83\,x + 16{,}45$ $y = 19{,}26\,x + 18{,}55$
T_{10}	% gonflement	0-6 6-12	NS NS	
T_{10}	% MO	0-6 6-12	0,46** 0,45**	$y = 6{,}17\,x + 13{,}95$ $y = 6{,}05\,x + 12{,}12$
T_{10}	CE (méq./100 g)	0-6 6-12	0,45** 0,32**	$y = 1{,}40\,x + 14{,}17$ $y = 1{,}02\,x + 16{,}59$
T_{10}	L_v (cm/cm^3)	0-6 6-12	NS NS	
T_{10}	1/S	0-6 6-12	0,29* 0,23*	$y = 1{,}72\,x + 29{,}17$ $y = 0{,}49\,x + 29{,}38$

(1) Il s'agit du limon 2-50 μ.
NS non significatif.
* significatif P = 0,05.
** significatif P = 0,01.

a) *Les facteurs « neutres ».*

Il apparaît que le système racinaire, le taux d'argile et le gonflement ne sont pas statistiquement liés à l'apparition et au développement de la granulation.

Le système racinaire.

Il n'existe pas de corrélation significative entre la longueur de racines par unité de volume de sol en place (L_v) et le taux d'éléments inférieurs à 10 mm. Autrement dit, le degré de granulation d'une structure n'est pas lié à la densité d'enracinement. Le tableau 2 montre que les valeurs moyennes de L_v étaient très différentes dans les couches étudiées (du simple au double quand on passe de 6-12 à 0-6), mais que dans chacune de ces couches elles étaient voisines d'un type de structure à l'autre, à l'exception des terres granulaires légères qui présentent des L_v plus élevées, notablement dans la couche 0-6 cm. Les figures 1 et 2 précisent ce dernier point en illustrant la distribution fréquentielle de L_v pour les différents types de structure. Ainsi, il apparaît que, dans la couche 0-6, les valeurs élevées de L_v sont les plus fréquemment associées aux structures granulaires légères.

TABLEAU 2

Éléments descriptifs des états structuraux

	Continus				Incertains				Granulaires légers				Granulaires normaux			
	0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm				0-12 cm			
	Moyenne		Écart type		Moyenne		Écart type		Moyenne		Écart type		Moyenne		Écart type	
Argile (%)	21,2		8,6		20,4		9,2		12,6		5,6		28,3		11,2	
Limon (%)	46,0		14,2		52,0		11,8		32,5		19,2		45,4		9,1	
Argile/Limon (1)	0,461		0,052		0,392		0,047		0,387		0,065		0,623		0,058	
Matières organiques (%)	2,27		0,73		2,51		1,06		3,18		1,84		3,84		2,70	
CE (méq/100 g)	11,2		3,9		12,0		5,9		8,4		3,8		17,4		5,4	
Gonflement potentiel (%)	11,06		6,70		13,04		8,57		6,08		4,87		21,44		14,75	
	0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm		0-6 cm		6-12 cm	
	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.	M	E. T.
Stabilité (S)	2,49	1,73	2,74	1,98	2,10	1,36	2,26	1,48	0,95	0,87	1,02	1,05	2,39	2,90	2,51	2,58
Agrégats stables au benzène (Ag_b %)	5,33	2,84	4,43	3,47	8,82	11,05	7,73	10,21	10,40	9,00	10,40	9,50	12,90	15,30	13,30	15,70
Longueur volumique L_v (cm/cm^3)	32,3	19,9	13,0	6,3	37,1	18,0	19,8	19,0	43,5	23,9	20,4	18,5	33,0	21,0	13,1	6,2
Él. struct. < 10 mm (%)	3,6	2,5	4,2	2,5	14,3	6,4	12,4	5,2	46,0	12,4	48,9	17,5	54,0	21,0	48,0	25,0
Nbre d'échant. étudiés	12		12		21		21		14		14		24		24	

(1) Il s'agit du limon 2-50 μ.

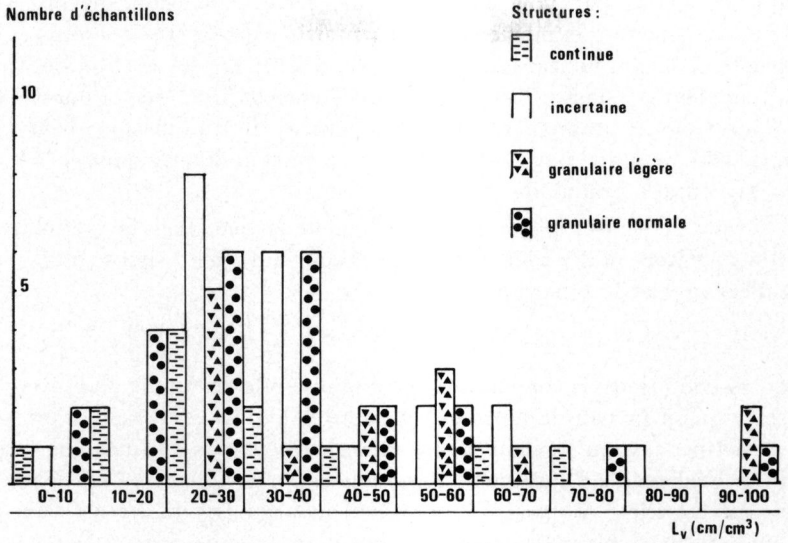


FIG. 1. — *Histogrammes des longueurs volumiques de racines,* L_v (cm/cm³), *dans les différentes catégories de structure* (couche 0-6 cm)

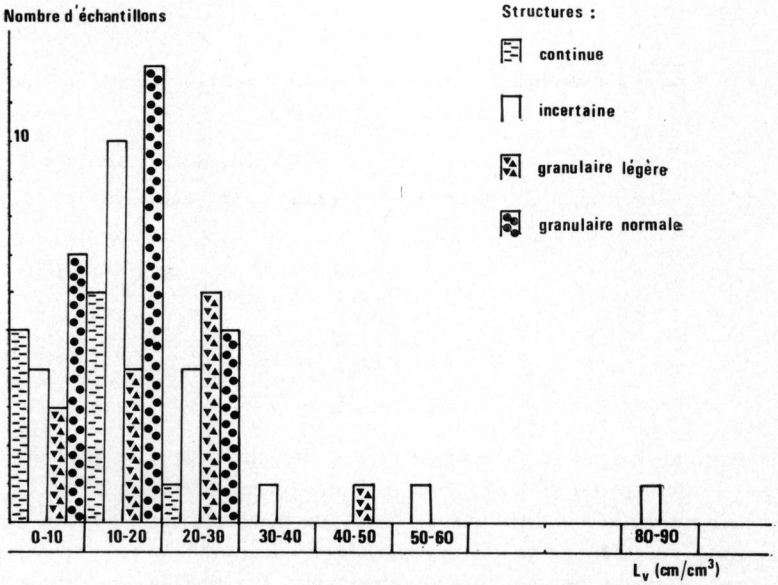


FIG. 2. — *Histogrammes des longueurs volumiques de racines,* L_v (cm/cm³), *dans les différentes catégories de structure* (couche 6-12 cm)

Il semble donc que l'intensité de l'enracinement n'intervient ici ni sur l'apparition d'une structure granulaire ni sur son degré de développement. Rapprochée des résultats obtenus par voie expérimentale, cette conclusion suggère qu'entre 0 et 12 cm, la densité d'enracinement sous prairie s'est avérée toujours suffisante pour déclencher la granulation lorsque les propriétés du sol et les conditions de milieu la rendaient possibles ; il se trouve également confirmé que la densité d'enracinement n'est pas à proprement parler un facteur de granulation. Nous verrons plus loin qu'elle apparaît, par contre, comme un facteur déterminant de la taille des éléments structuraux granulaires lorsqu'ils existent.

— *L'argile* ne semble pas entrer directement en jeu dans la granulation. On doit toutefois noter qu'il existe une corrélation hautement significative entre la capacité d'échange et le taux d'argile :

$$CE = 0{,}57\ A\ p.\ 100 + 0{,}52 \qquad r = 0{,}84^{**}$$

Dans ces conditions, la conclusion concernant le rôle de l'argile doit être réservée. On constate qu'au niveau de notre analyse l'argile en tant que telle n'est pas liée à l'état structural. Ce qui revient à dire qu'on ne peut pas affirmer que la participation reste négligeable dans toute la gamme des assemblages d'éléments constitutifs du sol. En effet, ARCA et WEED (1966) ont montré qu'il existe une liaison linéaire hautement significative entre le taux d'argile et le degré d'agrégation des éléments structuraux de taille relativement petite, ne dépassant pas 1 mm (tabl. 3). Ces résultats suggèrent que chaque fois qu'une distribution comprendra un taux suffisant d'éléments compris entre 1 et 10 mm (cas des prairies), cette distribution sera indépendante du taux d'argile.

TABLEAU 3

Relation entre le degré d'agrégation d'éléments structuraux d'une taille donnée et le taux d'argile (ARCA ET WEED, 1966)

Taille (mm)	Coefficient de régression	Valeurs F
0,10	+ 0,896 0	53,87**
0,25	+ 0,964 7	30,62**
0,50	+ 0,856 9	17,62**
1,00	+ 0,623 6	9,19**
2,00	+ 0,086 8	NS

— Quant au *coefficient de gonflement potentiel,* il n'apparaît pas significativement lié à l'intensité de la fissuration, si l'on considère comme nous l'avons fait jusqu'ici l'ensemble des échantillons. Ce point mérite discussion. En effet, l'approche expérimentale du phénomène de granulation avait montré (TRI, 1968) que c'est par l'intermédiaire des gonflements et retraits liés aux phases successives de dessiccation et d'humectation des matériaux suffisamment argileux que se déclenchaient la fissuration et l'individualisation des granules. Par ailleurs, nous avons vu (tabl. 2) que le groupe des structures granulaires normales correspondait à un coefficient de

gonflement potentiel (G) moyen, nettement plus élevé que celui des structures continues ou incertaines. Une telle contradiction peut être levée en admettant que G intervient non pas sous forme d'un facteur agissant de façon continue sur le degré de développement de la granulation, mais qu'il doit exister un seuil de gonflement minimum, et donc de retrait, celui-ci étant évalué approximativement à 15 p. 100, valeur devant être dépassée pour qu'un phénomène de granulation normal puisse se déclencher lorsque les autres conditions sont favorables.

En fait, il existe, comme le montre la figure 3, une relation assez étroite entre le coefficient G, la texture en général et le taux d'argile en particulier. L'équation de régression suivante traduit les variations de G en fonction de ce dernier :

$$G = 0{,}64\ A \text{ p. } 100 - 0{,}04 \qquad \text{avec } r = 0{,}69^{**}$$

Par ailleurs, il est à noter qu'à l'exception des structures granulaires légères, la répartition des structures continues et granulaires normales se fait essentiellement en fonction du comportement à la fissuration des terres suivant le schéma proposé

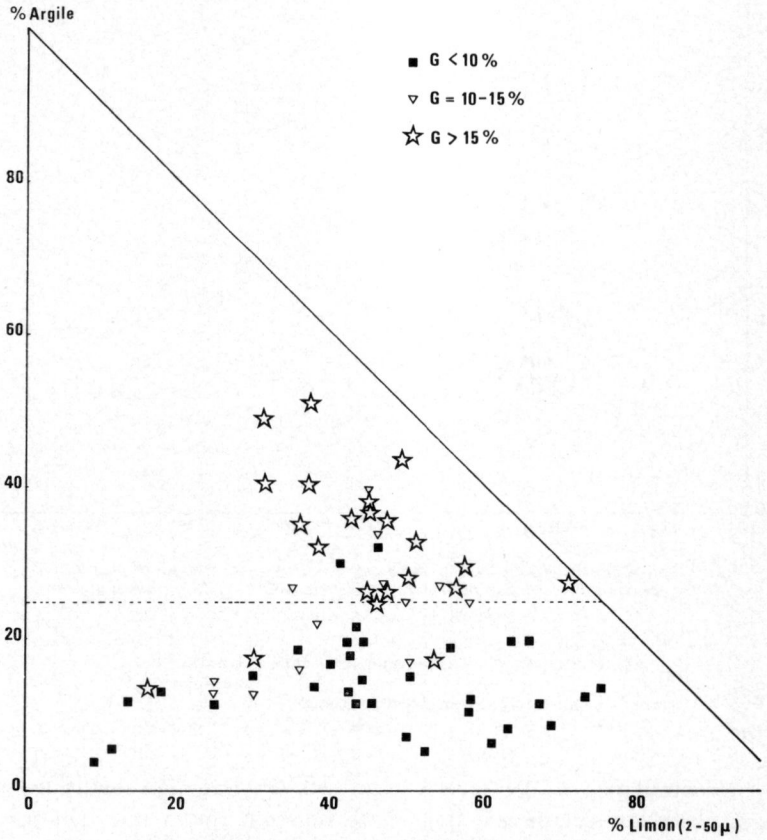


FIG. 3. — *Classement du gonflement potentiel G en fonction de la texture*

par HÉNIN et BOSQUET (1964). Ainsi, peut-on constater sur la figure 4, qu'au-dessus de la droite AB (ayant pour équation Argile (p. 100) = — 0,5 Limon (2-20 µ) + 30) qui constitue le seuil des terres fissurables, au moins 75 p. 100 de ces terres sont

granulaires. Par ailleurs, la zone intermédiaire, comprise entre les droites AB et CD (A = — 1,66 L + 20) qui, selon HÉNIN et BOSQUET comprend aussi bien des terres fissurables que des terres qui s'effritent (ou non fissurables), comprend à la fois ici des terres à structures granulaires légères et continues. Enfin, au-dessous de la droite CD qui délimite la zone d'effritement, on a affaire, selon ces auteurs, à des

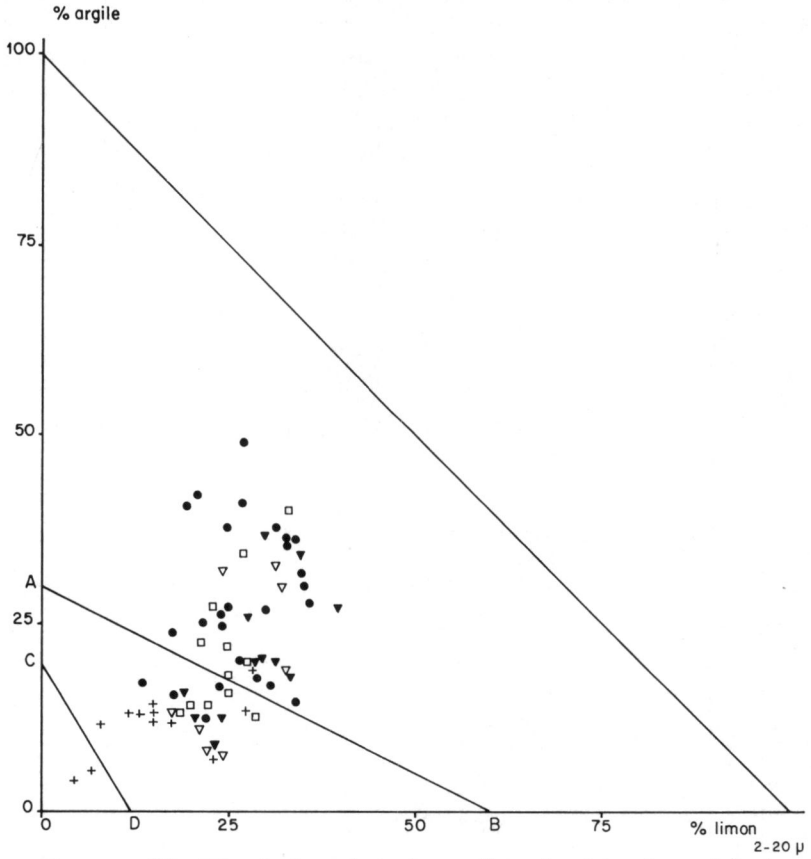


FIG. 4. — *Répartition des terres à structure continue, incertaine et granulaire en fonction de leur comportement à l'effritement et à la fissuration*
(suivant HÉNIN et BOSQUET)

□ Structures continues
▽ Structures incertaines à tendance continue
▼ — — — — granulaire
● Structures granulaires normales
\+ — — légères

terres ne présentant pas de cohésion à l'état sec. Or, dans les conditions de notre enquête, les terres qui se trouvent dans cette zone ont toutes une structure granulaire légère. Il faut cependant préciser que les échantillons qui servaient à l'étude de HÉNIN et BOSQUET étaient pratiquement dépourvus de matières organiques, alors que les nôtres en contiennent en moyenne 3,15 p. 100 (tabl. 2).

Il est à souligner également que les échantillons de l'enquête qui se trouvent dans la zone d'effritement font partie du groupe de terres à structure granulaire

légère qui, à l'encontre des terres granulaires normales, possèdent un coefficient de gonflement potentiel très faible (voisin de 6 p. 100 en moyenne contre 21 p. 100, tabl. 2). Il est vraisemblable que le mécanisme de formation de ces structures est différent. TRI (1968) a montré que la granulation pouvait intervenir soit par fissuration lorsque l'état structural initial était continu ou à base d'éléments de grande dimension, soit par agrégation à partir d'un état structural monoparticulaire ou très finement divisé. Dans le premier cas, correspondant à la plupart des sols fissurables suffisamment riches en éléments fins, le gonflement à l'origine de la fissuration joue un rôle essentiel : c'est le phénomène de granulation normale. Dans le second, particulier aux sols peu cohérents par constitution, ici le groupe des sols légers, l'agrégation peut avoir pour origine un taux particulièrement élevé en matières organiques (ici plus de 3 p. 100 pour environ 13 p. 100 d'argile en moyenne) et il n'est pas exclu qu'elle soit indépendante de la présence de la prairie *actuellement en* place.

b) *Les facteurs « actifs ».*

— *Parmi les facteurs de constitution*, la matière organique et la capacité d'échange pour les cations (tabl. 1) sont en corrélation hautement significative avec T_{10}. Il existe également une liaison, moins étroite, entre ce dernier et le rapport A/L. L'influence significative de ce rapport mérite quelque discussion. Il traduit en fait un effet texture et, en particulier, l'influence de l'argile en présence du limon et vice versa. L'examen des figures 3 et 4 montre, par exemple, qu'à un niveau de limon (2-50 μ ou 2-20 μ) donné, le gonflement ou la tendance à la fissuration augmente lorsque le taux d'argile augmente. En revanche, au-dessous d'un certain taux d'argile, ces manifestations diminuent quand le taux de limon augmente.

— En ce qui concerne *les paramètres exprimant un comportement physique*, la stabilité structurale (1/S) apparaît comme un facteur statistiquement lié à la granulation. Lors du choix des échantillons, nous avions éliminé les prairies de plus de 20 mois de façon à éviter une interaction systématique entre deux phénomènes : la granulation et la stabilisation de la structure sous prairie dont les études expérimentales séparées (MONNIER, 1965 ; TRI, 1968) avaient montré qu'ils ne dépendaient pas des mêmes facteurs. La variabilité des teneurs en matières organiques des sols

TABLEAU 4

Relation entre la stabilité structurale (1/S), *le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène* (Ag*b* p. 100) *et le taux de matières organiques du sol*

Variable dépendante y	Variable explicative x	Profondeur (cm)	r	Régression de y en x
1/S	Ag_b (%)	0- 6	0,54**	$y = 0{,}20\,x - 0{,}19$
		6-12	0,49**	$y = 0{,}58\,x - 2{,}35$
Ag_b (%)	MO (%)	0- 6	0,80**	$y = 5{,}22\,x - 6{,}30$
		6-12	0,80**	$y = 5{,}16\,x - 6{,}43$

étudiés et le fait que la stabilité structurale dépend étroitement de cette teneur, en particulier par l'intermédiaire du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène (tabl. 4), ont, malgré tout, permis à cette relation de se manifester. On peut supposer que la stabilité structurale intervient en permettant à une structure granulaire, développée lorsque les facteurs qui commandent son apparition sont à un niveau suffisant, de se maintenir au cours des périodes climatiques défavorables (humidité excessive et prolongée).

2. *Étude de corrélations multiples.*

De ce qui précède, il apparaît que seuls, le rapport A/L, les matières organiques (MO), la capacité d'échange (CE) et la stabilité structurale (1/S) jouent un rôle positif dans l'initiation et le développement de la granulation. Étant donné que CE et 1/S sont des propriétés qui découlent principalement des taux d'argile et de MO, il semble qu'en fin de compte, ce sont surtout A/L et MO qui sont les facteurs les plus importants.

Les calculs de corrélation multiple ont donné des résultats qui expliquent mieux ou qui font ressortir encore davantage les variations de T_{10} en fonction de ces 2 facteurs pour chacune des deux catégories de terres granulaires.

Pour les terres granulaires normales, on obtient la relation :

$$T_{10} = 26{,}66 + 4{,}06\ MO + 17{,}23\ A/L \text{ avec } R = 0{,}52^*$$

mais seulement pour la couche 0-6 cm.

Pour les terres granulaires légères, une équation de régression différente est obtenue :

$$T_{10} = 47{,}26 + 2{,}88\ MO - 21{,}75\ A/L$$

dont le coefficient de corrélation multiple n'est pas significatif ($R = 0{,}40$), mais qui est élevé par rapport aux coefficients de corrélation simple entre T_{10} et MO ou A/L. En outre, le signe du coefficient de A/L indique une influence négative de ce rapport sur ces terres.

Dans les 2 cas, les relations précédentes mettent en évidence l'effet de la composition granulométrique des terres sur leur aptitude à la granulation suivant leur nature.

B. — *Étude des facteurs commandant la taille des éléments structuraux granulaires*

Après avoir examiné les conditions d'apparition et de développement de la granulation, il reste à rechercher les facteurs qui déterminent la taille des éléments structuraux résultant de cette évolution. Pour cela, nous devons disposer d'une évaluation de celle-ci.

1. *Évaluation de la taille moyenne des éléments structuraux.*

Il est évident que T_{10} auquel nous avons eu recours jusqu'ici est désormais un critère insuffisant. Malgré la probabilité élevée de rencontrer des éléments structuraux d'autant plus petits que T_{10} est plus élevé, on peut envisager — et on a pu observer effectivement — qu'à des taux T_{10} voisins, puissent correspondre des tailles

moyennes de granules différentes et réciproquement. Rappelons que les distributions dimensionnelles d'éléments structuraux étant pratiquement normales ou log-normales (TRI et MONNIER, 1973), la taille moyenne φ peut être graphiquement évaluée.

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons uniquement aux moyennes.

Dans le cas des structures continues ou incertaines, la taille moyenne ne peut être obtenue, comme le montre la figure 5 (droites C et D), que par extrapolation de la droite de distribution sans transformation. Compte tenu du fait que, d'après le critère de classement que nous avons retenu, T_{10} est toujours respectivement < 10 p. 100 ou compris entre 10 et 30 p. 100, les moyennes de taille sont, dans le premier cas, plus élevées que les fragments soumis au test, ce qui correspond bien au concept de structure continue ; dans le cas des structures « incertaines », on se trouve en présence d'éléments structuraux d'une dimension moyenne voisine de 25 mm (partie pointillée droites C, fig. 5).

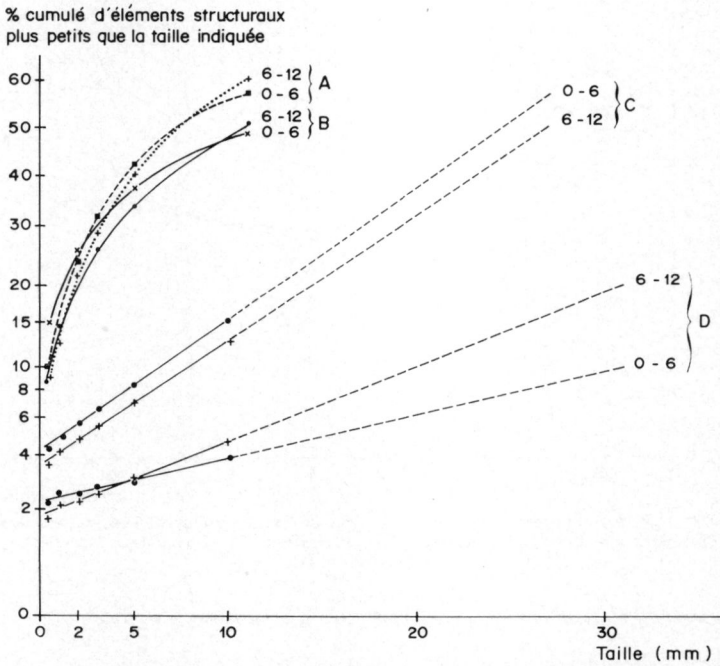


FIG. 5. — *Représentation gausso-arithmétique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues* (D), *incertaines* (C), *granulaires légères* (B) *et normales* (A)

Dans le cas des structures granulaires, à distribution plutôt log-normales (droites A et B, fig. 6), ce n'est pas la taille moyenne de l'ensemble de chaque distribution qui nous intéresse, mais plutôt celle des éléments de taille < 10 mm, caractéristiques de ce type de structure. Compte tenu de la distribution de ces classes de taille dans les structures granulaires, nous avons, en définitive, caractérisé cette sous-distribution par le diamètre correspondant à l'intersection du segment de droite qui la représente avec la droite d'ordonnée 30 p. 100.

Étant donné qu'apparemment les mécanismes de formation des structures

granulaires normales et légères ne sont pas les mêmes, comme cela a été souligné dans le mémoire précédent (TRI et MONNIER, 1973), ces deux types de structure seront étudiés séparément dans ce qui suit.

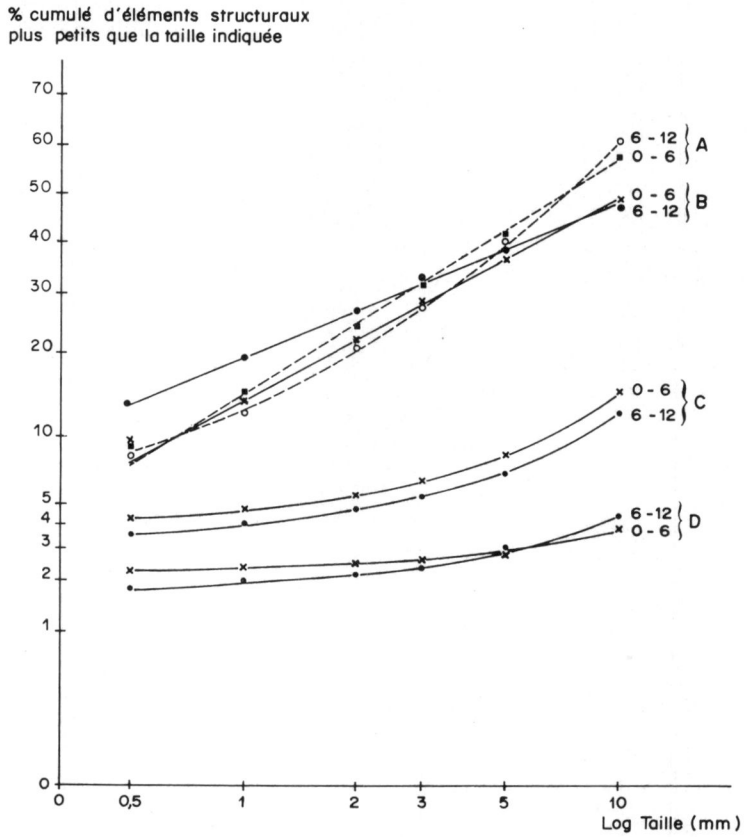


FIG. 6. — *Représentation gausso-logarithmique des distributions d'éléments structuraux provenant des structures continues* (D), *incertaines* (C), *granulaires légères* (B) *et normales* (A)

2. *Relation entre la taille et les caractéristiques du système sol-racines.*

a) *Terres granulaires normales.*

α. *Corrélations linéaires simples.*

Parmi les facteurs déjà pris en considération pour T_{10}, un seul, I/S est significativement lié à la taille moyenne φ pour la couche 0-6 cm seulement, suivant la relation :

$$\varphi = 5{,}38 - 0{,}43\ \text{I/S} \qquad \text{avec } r = 0{,}42^{*}$$

β. *Les corrélations linéaires simples avec ajustement exponentiel.*

Par contre, un ajustement en log φ (1) a non seulement amélioré la relation ci-dessus, mais abouti également à d'autres relations significatives rapportées dans le tableau 5.

(1) Dans tout ce qui suit, il s'agit des logarithmes décimaux.

TABLEAU 5

Corrélations simples faisant apparaître les facteurs susceptibles d'influencer la taille moyenne φ des éléments structuraux dans les sols granulaires normaux et légers

Variable dépendante	Variable explicative	Profondeurs (cm)	Granulaires normales		Granulaires légères	
			r	Régression	r	Régression
$\log\varphi$ (φ en mm)	Argile (%)	0-6	NS		NS	
		6-12	NS		NS	
	A/L	0-6	NS		NS	
		6-12	NS		NS	
	MO	0-6	— 0,509 5**	$\log\varphi$ = 0,857 2 — 0,075 2 MO	NS	
		6-12	— 0,617 3**	$\log\varphi$ = 1,141 5 — 0,106 1 MO	— 0,527 9*	$\log\varphi$ = 0,991 1 — 0,12 MO
	CE	0-6	— 0,603 9**	$\log\varphi$ = 1,195 9 — 0,035 2 CE	NS	
		6-12	— 0,481 4*	$\log\varphi$ = 1,325 0 — 0,032 4 CE	NS	
	G	0-6	NS		NS	
		6-12	NS		NS	
	1/S	0-6	— 0,453 0*	$\log\varphi$ = 0,704 6 — 0,059 7 1/S	NS	
		6-12	— 0,614 3	$\log\varphi$ = 0,951 0 — 0,112 4 1/S	— 0,539 8*	$\log\varphi$ = 0,712 7 — 0,025 1/S
	L_v	0-6	— 0,437 1*	$\log\varphi$ = 0,849 0 — 0,007 7 L_v	— 0,667 9**	$\log\varphi$ = 1,136 7 — 0,011 3 L_v
		6-12	NS		NS	

Remarque : il s'agit des logarithmes décimaux.
NS : non significatif.
* : significatif à 0,05.
** : significatif à 0,01.

On constate que ce sont à peu près, à l'exception du rapport A/L, les mêmes facteurs que ceux qui commandent l'apparition et le développement de la granulation qui influent sur la taille des éléments, et cela, pour l'affiner. De plus, il est à remarquer surtout l'intervention significative de la longueur volumique L_v des racines, également dans le sens d'affinement, dans la couche 0-6 cm.

γ. *Corrélations linéaires simples avec ajustement hyperbolique.*

On constate que la relation log φ et CE n'est pas améliorée quand elle est étudiée sous la forme log φ et log CE :

$$r = -0{,}591\,5^{**} \text{ (0-6 cm) et } r = -0{,}444\,2^{*} \text{ (6-12 cm)}$$

par rapport à $r = -0{,}603\,9^{**}$ et $-0{,}481\,4^{*}$ respectivement.
Il en est de même pour log φ et log L_v :

$$r = -0{,}423\,3^{*} \text{ (0-6 cm seulement) par rapport à } -0{,}437\,1^{*}$$

En revanche, l'ajustement hyperbolique a sensiblement renforcé les liaisons entre φ et MO ou 1/S. Nous avons ainsi obtenu les équations de régression hautement significatives suivantes :

— entre log φ et log MO :

$$\log \varphi = 1{,}133\,6 - 1{,}086\,8 \log \text{MO (0-6 cm) avec } r = -0{,}517\,0^{**}$$
$$\log \varphi = 1{,}617\,2 - 1{,}694\,7 \log \text{MO (6-12 cm) avec } r = -0{,}699\,0^{**}$$

— entre log φ et log 1/S :

$$\log \varphi = 0{,}547\,4 - 0{,}429\,4 \log 1/\text{S (0-6 cm) avec } r = -0{,}570\,1^{**}$$
$$\log \varphi = 0{,}722\,0 - 0{,}620\,7 \log 1/\text{S (6-12 cm) avec } r = -0{,}647\,9^{**}$$

δ. *Remarque.*

En définitive, il apparaît que, lorsqu'ils interviennent, les facteurs du sol le font en affinant la taille suivant une relation exponentielle quand il s'agit de CE et L_v, et selon une forme hyperbolique lorsqu'on a affaire à MO ou 1/S.

b) *Terres granulaires légères.*

α. *Corrélations linéaires simples.*

Les calculs ont montré une dépendance linéaire entre L_v et φ dans la couche 0-6 cm seulement, traduite par l'équation de régression :

$$\varphi = 10{,}37 - 0{,}096\ L_v \qquad \text{avec } r = -0{,}62^{*}$$

β. *Les ajustements exponentiels* ont non seulement amélioré la relation entre φ et L_v (tabl. 5), mais font apparaître en outre des relations significatives entre φ et MO ou 1/S pour la couche 6-12 cm.

γ. Contrairement au cas des terres granulaires normales, l'*ajustement hyperbolique* n'a pas donné lieu à des liaisons renforcées entre log φ et log MO ou log 1/S. En revanche, la relation entre φ et L_v est devenue nettement plus étroite sous forme de log φ et log L_v (tabl. 6).

3. *Étude de la variation de la taille moyenne φ en fonction de MO et L_v.*

Si l'on considère que la capacité d'échange CE et l'indice de stabilité structurale I/S sont des caractéristiques qui découlent en grande partie de la présence des matières organiques et qui sont par conséquent implicitement prises en compte lorsqu'on étudie ces dernières, il apparaît qu'en fin de compte ce sont essentiellement MO et L_v qui influent directement sur φ. Une analyse plus poussée des relations entre ces variables se trouve de ce fait justifiée.

TABLEAU 6

Nature des liaisons entre la taille moyenne φ des éléments structuraux et la longueur volumique L_v des racines

(couche 0-6 cm)

Granulaires légères

Variable dépendante	Variable explicative	r	Régression
φ mm	L_v (cm/cm³)	— 0,621 6*	$\varphi = 10{,}376\,2 - 0{,}096\,4\ L_v$
log φ	L_v	— 0,667 9**	$\log \varphi = 1{,}136\,7 - 0{,}011\,3\ L_v$
log φ	log L_v	— 0,727 5**	$\log \varphi = 3{,}115\,0 - 1{,}554\,0 \log L_v$ (1)

Granulaires normales

Variable dépendante	Variable explicative	r	Régression
φ mm	L_v (cm/cm³)	NS	
log φ	L_v	— 0,437 1*	$\log \varphi = 0{,}849\,0 - 0{,}007\,7\ L_v$
log φ	log L_v	— 0,423 3*	$\log \varphi = 1{,}184\,1 - 0{,}425\,0 \log L_v$ (2)

a) *Relation entre φ et MO.*

L'examen du tableau 5 a montré que les MO interviennent en affinant la taille φ. Ces résultats semblent être en contradiction avec ceux présentés par OSTY (1971). A la suite d'un essai de quantification de l'aptitude à la fissuration des terres très argileuses (40-65 p. 100 argile) se trouvant au sud de la Meurthe-et-Moselle, l'auteur a montré que la taille moyenne D (mm) des éléments structuraux augmente en présence des matières organiques (MO) suivant l'équation :

$$\frac{10}{D} = 0{,}28\ (CE - 3\ MO) - 3{,}36$$

dans laquelle CE = capacité d'échange. Ces deux aspects apparemment contradictoires proviennent en fait de deux phénomènes différents qui ont été mis en évidence.

OSTY a montré par la relation ci-dessus que le comportement des terres à fortes teneurs en argile est en partie lié à leurs teneurs en matières organiques. Ces dernières étant relativement faibles (3-4 p. 100 en moyenne), toute stabilité structurale qui

en découle est vraisemblablement négligeable et, par conséquent, ne peut pas être invoquée pour expliquer les différences de comportement observées. L'auteur a, par ailleurs, émis l'hypothèse que la présence des matières organiques limite la fréquence des ruptures du matériau suivant un mécanisme imputable à la cinétique de la dessiccation. Il s'agit donc d'une analyse de l'influence des matières organiques sur l'aptitude à la fissuration.

Dans notre étude, les rapports des teneurs matières organiques/argile sont relativement plus élevés que dans le cas précédent, et il est montré que l'intervention des phénomènes de stabilisation est hautement significative. Les équations obtenues tiennent compte des conséquences de ces phénomènes et expriment dans ces conditions les relations entre MO et les tailles moyennes des éléments structuraux *stabilisés*.

b) *Influence du système racinaire sur la taille* φ.

Ce système est défini par les paramètres L_s (longueur spécifique) et L_v (longueur volumique) obtenus par les méthodes que nous avons décrites antérieurement (TRI et MONNIER, 1973). Ces paramètres nous ont permis de déterminer la longueur du système par unité de poids de racines propre à chaque espèce de graminées et de caractériser la densité d'enracinement (tabl. 7).

TABLEAU 7

Longueur spécifique, L_s, des espèces de graminées fourragères implantées sur les prairies étudiées

Espèces de graminées	Nombre d'échantillons	L_s (cm/g)			
		0 — 6 cm		6 — 12 cm	
		Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type
Ray-Grass Italie	29-34	14 236	3 147	15 210	3 660
Fétuque des Prés	5	12 694	2 286	15 173	2 605
Dactyle ou Fléole	10	10 515	3 310	15 745	4 940
Fétuque élevée	13	9 838	4 260	10 695	3 092
Mélange de plusieurs .... graminées	10	9 926	2 531	11 183	3 510
Total	67-72				

On constate en premier lieu, une augmentation systématique des L_s lorsqu'on passe de 0-6 à 6-12 cm. De plus, l'examen des valeurs de L_s dans chacune de ces deux couches permet de relever des différences entre les différentes espèces de graminées. On note par exemple qu'en surface (0-6 cm), ces dernières se distinguent par ordre croissant de L_s de la manière suivante : Fétuque élevée < Dactyle ou Fléole < Fétuque des prés < Ray-grass d'Italie. En revanche, elles se classent différemment en profondeur (6-12 cm) : Fétuque élevé < Fétuque des prés ou Ray-grass d'Italie < Dactyle ou Fléole. Ces observations montrent que la taille des racines n'est pas la même pour toutes les espèces et que, pour chaque espèce, elle n'est pas toujours la même non plus en fonction de la profondeur. Dans ces conditions,

les valeurs de L_s présentent un intérêt intrinsèque puisqu'elles peuvent servir comme indices de différentiation entre les espèces de graminées tout en reflétant la finesse du système racinaire tant en surface qu'en profondeur.

Par ailleurs L_s est nécessaire pour calculer L_v. Ce dernier est un indice de densité d'enracinement ; il reflète la distribution racinaire dans l'espace que nous allons étudier en relation avec la taille des éléments structuraux obtenus par le test à l'alcool sur les terres granulaires. Les figures 1 et 2 indiquent la distribution des valeurs de L_v dans les diverses catégories de structures et dans les 2 profondeurs étudiées.

c) *Relations linéaires simples entre* φ *et* L_v.

Les liaisons obtenues sont significatives seulement dans la couche 0-6 cm, aussi bien pour les terres granulaires légères que pour les terres granulaires normales. Le tableau 6 montre que la corrélation linéaire entre φ et L_v est également non significative dans la couche 0-6 cm des terres granulaires normales et que, par contre, un ajustement exponentiel ($\log \varphi = f(L_v)$) ou hyperbolique ($\log \varphi = f(\log L_v)$) donne des coefficients de corrélations significatifs et hautement significatifs pour les terres granulaires normales et granulaires légères respectivement.

Le caractère non significatif ou relativement lâche de la relation $\varphi = f(L_v)$ (tabl. 6) doit être attribué à l'inadéquation du modèle linéaire. Pour les terres granulaires légères, l'examen des coefficients de corrélation (tabl. 6) suggère que c'est l'ajustement hyperbolique $\log \varphi = f(\log L_v)$ qui traduit incontestablement le mieux la relation entre ces 2 variables. L'étroite relation qui existe sous cette forme est illustrée par la figure 7. Pour les terres granulaires normales les coefficients de corrélation obtenus par ajustement exponentiel ($r = -0{,}437\,1$*) ou hyperbolique ($r = -0{,}423\,3$*) sont du même ordre de grandeur. La figure 8 illustre la position relative des courbes représentant ces ajustements par rapport aux points expérimentaux. Il est difficile, au vu de cette figure, de dire laquelle de ces 2 courbes traduit un meilleur ajustement. Évidemment, on serait tenté de choisir l'ajustement exponentiel parce qu'il aboutit à un coefficient r plus élevé ($-0{,}437\,1$ contre $-0{,}423\,3$). Par contre, les résultats antérieurs (Tri, 1968) indiquent plutôt une relation hyperbolique. Nous allons essayer de voir d'abord dans quelle mesure cette relation est également vérifiée ici.

d) *Mécanisme déterminant la taille* φ.

— *Hypothèse de division cubique.*

Dans un travail antérieur (Tri, 1968), nous avons associé l'influence des racines sur la taille des éléments structuraux à une simple division cubique. Soit un cube de sol de 1 cm de côté. Si ce cube est divisé en n^3 petits cubes de $1/n$ cm de côté, la longueur volumique L_v de racines correspondante à la longueur totale des arêtes de ces cubes serait :

$$L_v = 3n^2$$

Introduisons la taille φ en posant $\varphi = \frac{10}{n}$ mm, il vient :

$$\varphi = 17{,}3 L_v^{-0{,}5}$$

C'est une fonction hyperbolique reliant théoriquement φ à $\frac{1}{\sqrt{L_v}}$.

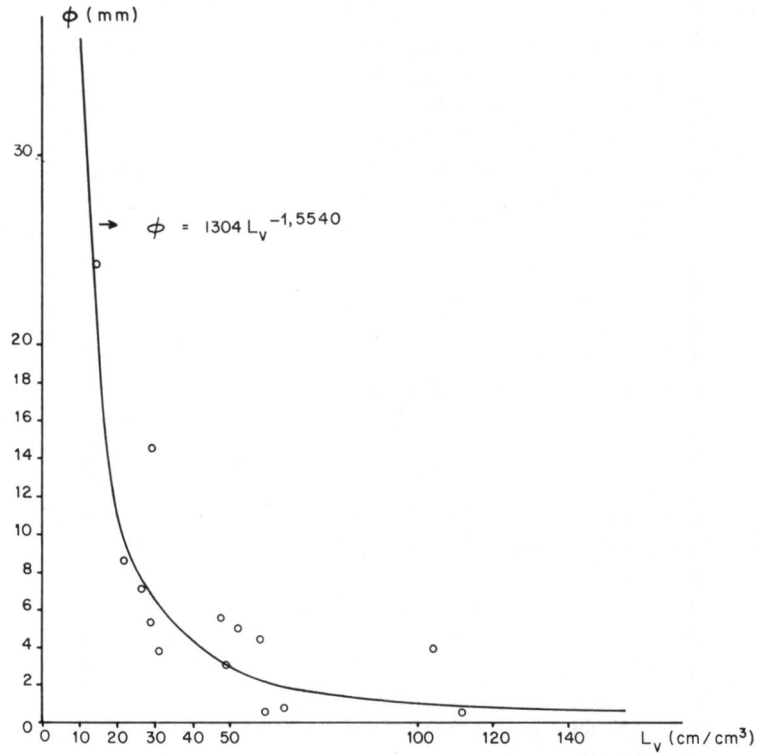


FIG. 7. — *Relation entre la taille moyenne φ des éléments structuraux et la longueur volumique L_v dans les terres granulaires légères* (couche 0-6 cm)

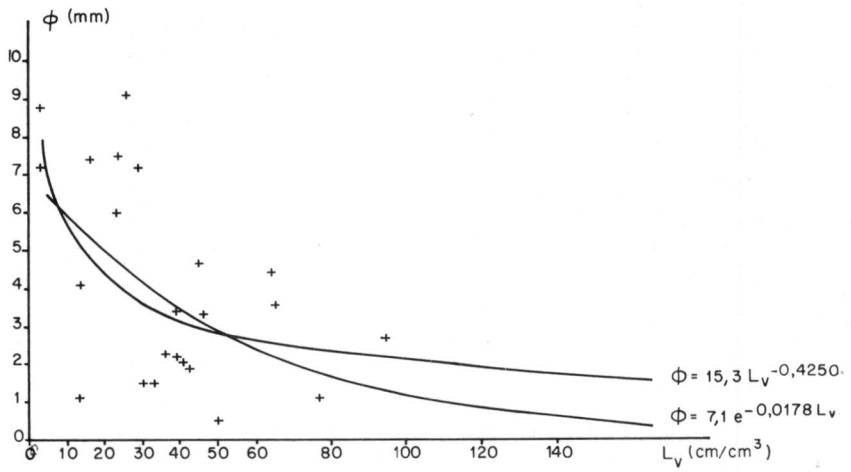


FIG. 8. — *Courbes représentant les ajustements exponentiel et hyperbolique des relations entre la taille moyenne φ des éléments structuraux et la longueur volumique L_v des racines dans les terres granulaires normales* (0-6 cm)

\+ : points expérimentaux

Les équations de régression (1) et (2) du tableau 6 peuvent être écrites sous les formes équivalentes respectives suivantes :

$$\varphi = 1\,304 L_v^{-1,554\,0}$$

et

$$\varphi = 15{,}3 L_v^{-0,425\,0}$$

Les coefficients et les exposants de L_v dans ces deux équations montrent que φ varie d'une manière différente dans les deux types de structures granulaires observées (fig. 9) et que, seules, les variations de φ dans les terres granulaires normales sont conformes au modèle de division cubique.

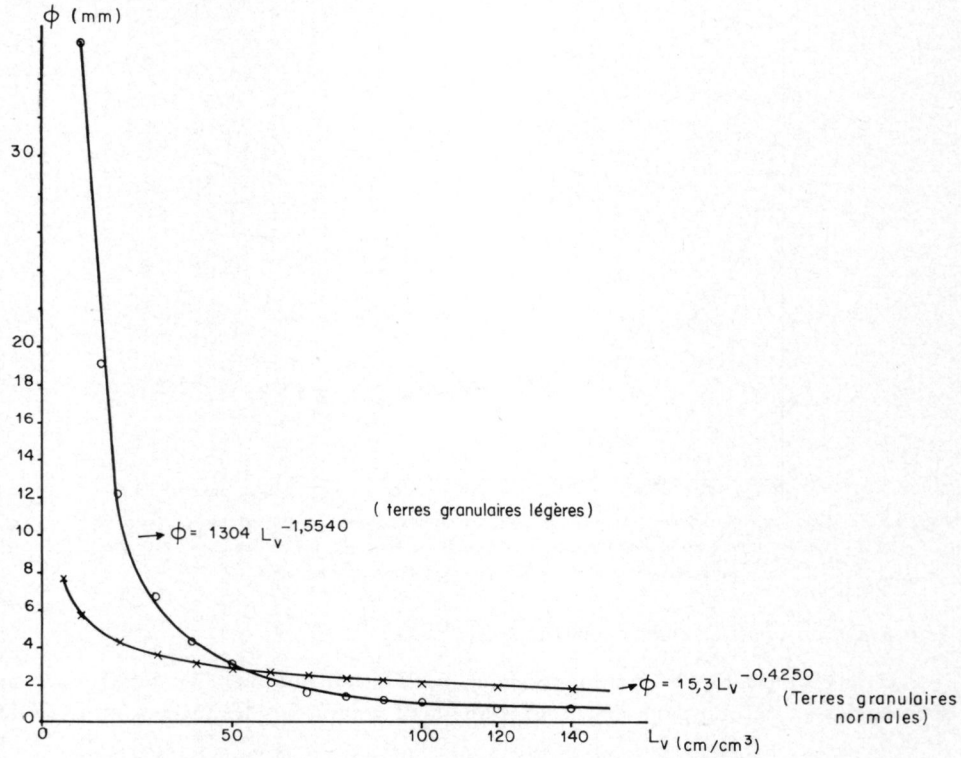


FIG. 9. — *Comparaison des variations de la taille moyenne φ des éléments structuraux en fonction de la longueur volumique L_v des racines dans les terres granulaires légères et normales* (couche 0-6 cm)

— *Hypothèse de division sphérique.*

En ce qui concerne les terres granulaires normales, la relation $\varphi = 15{,}3 L_v^{-0,425\,0}$ donne des valeurs qui se rapprochent encore davantage des valeurs théoriques si l'on admet que les éléments structuraux produits par la division du cube de terre initial sont sphériques plutôt que cubiques. Dans ces conditions, on peut considérer les éléments structuraux comme des sphères ayant chacune le même volume que les petits cubes envisagés au paragraphe précédent. Leur diamètre d, exprimé en mm découle alors de l'égalité :

$$\frac{\pi d^3}{6} = \frac{10^3}{n}$$

En admettant que L_v conserve la même valeur : $L_v = 3n^2$ et, en remplaçant n par sa valeur en fonction de d, on obtient une équation théorique de division sphérique :

$$d = \varphi = 21{,}5 L_v^{-0{,}5}$$

La figure 10 montre la position relative de la courbe représentant les points expérimentaux par rapport aux courbes traduisant les hypothèses de division cubique ou sphérique. On voit qu'à partir d'un L_v donné ($L_v \simeq 20$), la courbe résultant de l'ajustement statistique des points expérimentaux se confond pratiquement avec celle qui représente une division sphérique.

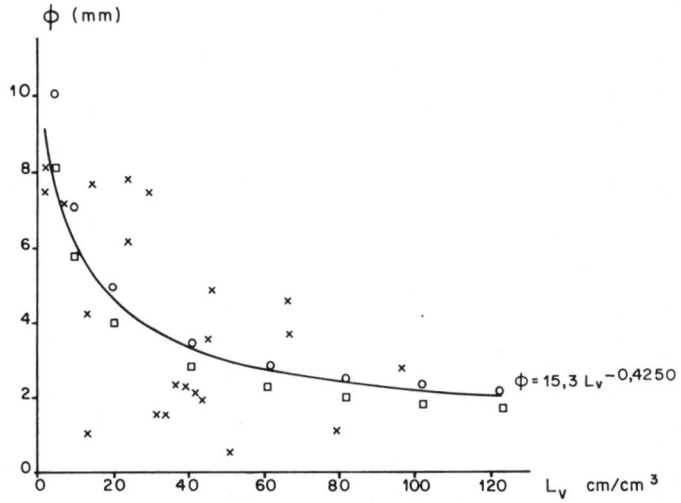


FIG. 10. — *Degré de concordance entre la courbe représentant l'ajustement statistique des tailles observées* (x), *et les courbes représentant des modèles de division cubique* (□) *ou de division sphérique* (○) *dans la couche 0-6 cm des terres granulaires normales*

4. *Corrélation multiple entre φ, MO et L_v.*

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié en quelques détails l'action séparée des matières organiques et de la longueur volumique des racines sur la taille

TABLEAU 8

Coefficients de corrélation indiquant le degré et la nature des liaisons entre la taille φ et L_v ou MO

Variable dépendante	Variable explicative	Granulaires normales		Granulaires légères	
		0 - 6	6 - 12	0 - 6	6 - 12
log φ	log L_v	— 0,423 3*	— 0,200 6 NS	— 0,727 5**	— 0,28 NS
	L_v	— 0,437 1*	— 0,272 8 NS	— 0,667 9**	— 0,437 0 NS
log φ	log MO	— 0,517 0**	— 0,699 0**	— 0,426 9 NS	— 0,454 6 NS
	MO	— 0,509 5**	— 0,617 3**	— 0,507 4*	— 0,527 9 NS

TABLEAU 9

Régressions multiples mettant en évidence l'action intégrée de L_v et MO sur la taille moyenne φ

Groupe de terre	Prof.	Variable dépend.	Variable expl.	Variable expl.	Coeff. de corrél. multiple R	F Calc.	F tables	Régression multiple
Granulaires normales	0-6	log φ	log MO	L_v	– 0,660 7**	8,908 1	5,72	$\log \varphi = 1{,}362\,0 - 1{,}045\,6 \log MO - 0{,}007\,3\ L_v$
	6-12	log φ	log MO	L_v	– 0,765 0**	16,224 2	5,72	$\log \varphi = 1{,}919\,4 - 1{,}735\,3 \log MO - 0{,}022\,2\ L_v$
Granulaires légères	0-6	log φ	log L_v	MO	– 0,824 2**	11,649 9	7,21	$\log \varphi = 1{,}899\,3 - 0{,}602\,1 \log L_v - 0{,}111\,3\ MO$
	6-12	non significatif quel que soit l'ordre et la forme des variables utilisées						

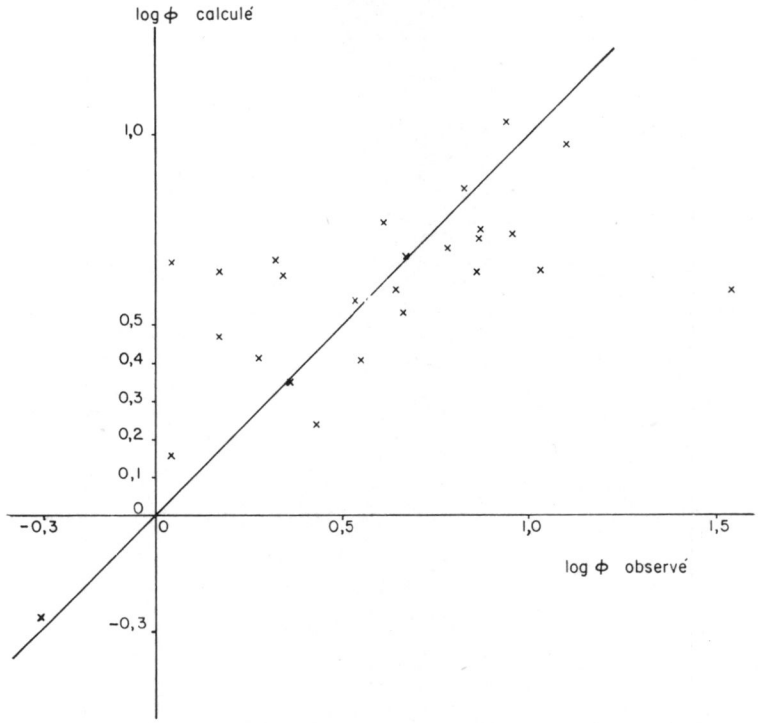


FIG. 11. — *Relation entre les log φ calculés à partir d'une équation de régression multiple et les log φ observés dans la couche 0-6 cm des terres granulaires normales*

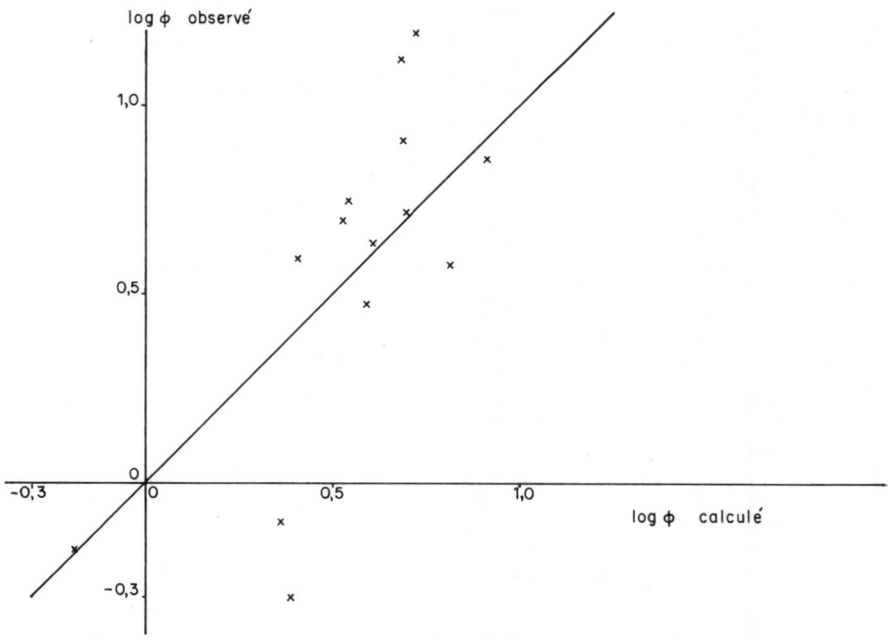


FIG. 12. — *Relation entre les log φ calculés par une régression multiple et les log φ observés dans les terres granulaires légères* (couche 0-6 cm)

moyenne. Il nous reste maintenant à déterminer dans quelle mesure les variations de φ pourraient être mieux expliquées, si l'on prend en considération l'action conjuguée de MO et L_v.

A partir du tableau 8 qui donne les coefficients des corrélations simples entre log φ et L_v ou log L_v d'une part, et entre log φ et MO ou log MO d'autre part, et cela, dans les 2 couches 0-6 et 6-12 cm des terres granulaires légères et normales, nous avons choisi les coefficients les plus élevés pour introduire en premier lieu la 1re variable et pour déterminer la forme de la variable (L_v ou log L_v ; MO ou log MO) à utiliser dans la régression multiple à calculer.

Les résultats obtenus (tabl. 9) indiquent qu'effectivement, MO et L_v pris ensemble expliquent encore mieux les variations de φ (les coefficients de corrélation multiple R sont nettement plus élevés que les coefficients de corrélation simple), et qu'en terres granulaires normales, log MO est la variable la plus importante alors qu'en terres granulaires légères, c'est log L_v qui est le facteur dominant. Les figures 11 et 12 illustrent le degré de concordance qui existe entre les log φ calculés et les log φ observés dans les terres granulaires normales et légères respectivement. Il apparaît qu'au moins 65,5 p. 100 et 71,5 p. 100 des points qui représentent des log φ calculés provenant des terres granulaires normales (fig. 11) et légères (fig. 12) respectivement, sont en accord avec les log φ observés correspondants, puisqu'ils sont groupés à proximité immédiate de la première bissectrice.

En ce qui concerne le mode d'action de L_v en terres granulaires normales et légères, des hypothèses peuvent être émises en examinant les coefficients de L_v dans les équations de régression multiples correspondantes (tabl. 9). Le fait que ces coefficients sont très faibles dans le cas des terres granulaires normales (0,007 3 et 0,022 2 dans les couches 0-6 cm et 6-12 cm respectivement) indique que L_v doit atteindre des valeurs assez grandes pour avoir une action notable sur log φ. Autrement dit, un certain seuil de L_v doit être atteint pour que l'influence de cette dernière puisse se faire sentir sur log φ.

Dans le cas des terres granulaires légères, le coefficient de log L_v est au contraire relativement élevé par rapport à celui de MO. Cela implique que l'effet de log L_v est dominant dans log φ et commence à jouer dès qu'il y a un peu de racines. Étant donné que L_v est liée à L_s qui varie suivant l'espèce de graminée, on peut également supposer que le système racinaire jouerait non seulement un rôle dominant, mais éventuellement spécifique dans la granulation des sols légers.

Enfin, lorsqu'il s'agit de terres mises en prairies depuis un certain nombre d'années, comme c'est le cas pour la plupart des échantillons de notre enquête, on peut considérer que les équations de régression multiples ci-dessus traduisent essentiellement un effet cumulatif sur log φ exercé par l'action combinée des générations de racines vivantes (L_v) et mortes (MO).

CONCLUSIONS

Par les relations qu'elle fait statistiquement apparaître entre les paramètres de granulation et certains facteurs du système sol-racines, la deuxième partie de cette étude de la granulation des sols sous prairie a permis de préciser un certain

nombre d'observations faites au cours d'un travail antérieur en vases de végétation et sur modèles (TRI, 1968). En outre, elle a permis de compléter la connaissance du phénomène en mettant en évidence le rôle d'autres facteurs.

Il est confirmé que le processus du développement de la granulation, représenté par le taux d'éléments structuraux inférieurs à 10 mm (T_{10}), n'est pas lié quantitativement au développement du système racinaire, représenté par la longueur volumique (L_v).

L'importance de la constitution du sol est précisée grâce au large éventail des échantillons traités. Le rôle de la composition granulométrique du sol apparaît plus nuancé ; en effet, le processus dépendrait du rapport A/L plutôt que du taux d'argile lui-même comme le laissait à penser les résultats antérieurs. En outre, l'action du taux des matières organiques, non envisagée jusqu'ici, s'affirme marquée et hautement significative.

Les différences des mécanismes de granulation qui distinguent les terres granulaires normales des terres granulaires légères apparaissent en fonction de l'allure des corrélations. Avec T_{10}, l'effet du rapport A/L, positif dans le premier cas, est négatif dans le second.

Si le système racinaire paraît peu intervenir au niveau du développement de la granulation, il devient un facteur important en ce qui concerne la finesse de celle-ci, caractérisée par la taille moyenne φ des éléments structuraux. Le second facteur actif est encore le taux des matières organiques. Le poids respectif de chacun de ces facteurs varie suivant qu'il s'agit de terres granulaires normales ou légères, comme il ressort des corrélations multiples avec log φ. Dans le premier cas, les coefficients de log MO et de L_v suggèrent un effet dominant des matières organiques et un effet relativement secondaire de L_v qui peut néanmoins devenir notable à partir d'un certain seuil qui semble se situer autour de $L_v = 20$ cm/cm³ (dans une gamme de variations de L_v de 5 à 120 cm/cm³) Dans le deuxième cas, log L_v semble être le facteur dominant qui agirait dès qu'il existe tant soit peu de racines.

Par ailleurs, il apparaît que sur les terres granulaires normales, la taille φ est reliée à la longueur volumique L_v suivant une équation très proche de celle qui traduit une division cubique, conformément au modèle que nous avions proposé. Il s'est avéré de plus, qu'un modèle de division sphérique traduit encore mieux les variations de φ en fonction de L_v. En revanche, la division des terres granulaires légères ne suit pas ces schémas bien qu'elle soit également traduite par une équation hyperbolique.

En définitive, l'analyse des résultats qui découlent de cette étude fait apparaître un nombre restreint de facteurs du système sol-racines statistiquement dominants dans le développement et la finesse de la granulation. L'un, le taux de matières organiques, intervient dans les 2 paramètres tandis que les 2 autres interviennent, l'un, au niveau du développement (le rapport A/L), l'autre, au niveau de la finesse (longueur volumique, L_v) des éléments structuraux.

Le fait que A/L intervienne dans l'expression du développement de la granulation, mais non L_v, confirme l'impression antérieure que « l'action des racines semble se borner à révéler, à accélérer, ou à fortement accentuer une évolution structurale essentiellement conditionnée par la texture du sol ».

Mais il apparaît que le mode d'action de la texture n'est pas univoque en raison des mécanismes différents pouvant intervenir et qui ont conduit à distinguer, tout

au long de cette étude, deux groupes de terres granulaires à comportement et propriétés différentes, les normales et les légères.

Pour les terres granulaires normales, le mécanisme de division déjà proposé (TRI, 1968 et 1969) reste valable : lorsqu'une terre est fissurable, les alternances d'humectations et de dessiccations différentielles favorisées par le fonctionnement du système racinaire peuvent déclencher la granulation qui varie alors, en intensité, suivant le rapport argile/limon et le taux de matières organiques, et en finesse, en fonction de log MO et de la longueur volumique des racines.

En revanche, le mécanisme de la granulation des terres légères reste mal connu encore et mérite une étude plus poussée pour les raisons signalées dans le premier mémoire (TRI et MONNIER, 1973). De même, il serait utile de chercher à préciser l'effet texture en l'étudiant, non seulement en fonction du taux d'argile en présence des différentes fractions du squelette, mais aussi en relation avec la nature et la garniture ionique de l'argile.

Enfin, un résultat nouveau de cette étude globale est d'avoir permis de mettre en évidence le rôle important de la matière organique dans les deux aspects du processus de granulation sous prairie. Ce constituant intervient vraisemblablement de plusieurs façons, d'une part, comme facteur de stabilité structurale ; d'autre part, il module l'action de la texture toujours dans un sens favorable.

C'est ainsi que les racines interviennent sur la finesse de l'état granulaire et qu'en augmentant la réserve organique, elles contribuent à accroître l'aptitude du sol à la granulation.

Reçu pour publication en avril 1973.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont bien voulu nous apporter leur concours pour le choix et la description des situations, ainsi que pour le prélèvement des échantillons : notamment la Direction agronomique, les ingénieurs et les techniciens régionaux de l'I. T. C. F., les Services agronomiques de différentes Sociétés d'Économie mixte d'Aménagement et diverses stations de l'I. N. R. A.

Nous tenons également à remercier M. R. BÉTRÉMIEUX pour ses critiques et ses suggestions qui ont beaucoup contribué à donner à ce mémoire sa forme définitive.

SUMMARY

QUANTITATIVE STUDY OF SOIL GRANULATION UNDER GRASSES. II. — GRANULATION PARAMETERS AND THEIR RELATION WITH SOIL PHYSICAL CHARACTERISTICS AND ROOT SYSTEMS

The degree of soil granulation and the size grade of the derived structural elements, represented by T_{10} (cumulative percentage of structural elements smaller than 10 mm, obtained by the alcohol test) and φ, respectively, were studied in relation to a number of factors (clay content, clay silt ratio A/L, cation exchange capacity, organic matter content MO, swelling potential, structural stability index, volumetric root length L_v) characteristic of the soil-roots system.

Simple and multiple correlation calculations have shown that T_{10} depended essentially on the A/L ratio whereas φ was significantly related to the volumetric root length L_v. In both cases highly significant correlations with organic matter content were also obtained. The relative importance of these factors varies with the two types of granular structures observed. For the

normal granular soils, T_{10} varies in direct relation with A/L and MO while in the so-called light granular soils, these two factors appear to act in opposite directions, A/L being associated with a negative coefficient.

As for φ, the mean size of the structural elements, it was found to vary with MO and L_v and also in different manners in the normal and light granular soils. The effect of MO seems to be more important than that of L_v in the first type of soil and vice versa in the second type. As a global result, however, φ becomes smaller as MO and/or L_v increase in magnitude.

Moreover, in the normal granular soils the variations of φ as a function of L_v appear to follow an hyperbolic equation that agrees with a previously proposed simple model of soil division. In the light granular soils, the relationship between φ et L_v is also of the hyperbolic type but does not fit the proposed model.

The above results confirm the existence of two distinct types of granular structures that are governed by different mechanisms and that have been noted by the authors in a previous publication. In addition, a number of observations made during previous studies in the greenhouse and with models, namely the hypotheses concerning the dynamics of the formation of normal granular soils proved to be valid.

ZUSAMMENFASSUNG

QUANTITATIVE UNTERSUCHUNG DER GRANULATION VON BÖDEN UNTER GRAMINEAE-WIESEN. II. — DIE GRANULATIONSPARAMETER IN ZUSAMMENHANG MIT DER PHYSIKALISCHEN ZUSAMMENSETZUNG DES BODENS UND DEM WURZELSYSTEM

Die Granulationsparameter werden als der summierte Anteil aller Strukturelemente unter 10 mm (T_{10}), die bei der Alkoholprobe erhalten werden und ihrem mittleren Durchmesser definiert. Diese Arbeit legt die Verhältnisse dar, die zwischen diesen Parametern und einer Anzahl von Eigenschaften bestehen (Tongehalt, Ton/Lehm-Verhältnis A/L, Austauschkapazität, Anteil an organischen Bestandteilen, potentieller Schwellanteil, struktureller Stabilitätsindex, Volumenslänge L_v der Wurzeln) des Systems Boden-Wurzeln.

Die Untersuchung dieser Zusammenhänge erstreckt sich auf zwei Hauptaspekte der Granulationserscheinung, nämlich dem Entwicklungsgrad und der Feinheit des Strukturzustands, die durch T_{10} bzw φ dargestellt werden. Die Berechnungen des linearen Zusammenhangs mit oder ohne Veränderungen der Variablen zeigen, dass die erhaltenen Zusammenhänge bei den beobachteten Granularstrukturen nicht gleich sind.

Das bemerkenswerteste Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass es die wichtige Rolle nachweist, die die organischen Stoffe bei den verschiedensten Aspekten der Granulation spielen. Diese Untersuchung bewies übrigens auch die Richtigkeit zahlreicher Beobachtungen, die bei anderen Untersuchungen gemacht worden waren, vor allem das Vorhandensein von zwei verschiedenen Granularstrukturtypen und die Hypothesen über die Granulationsdynamik der gewöhnlichen Erden.

РЕЗЮМЕ

БЮИ-ХЬЮ-ТРИ, Г. МОННЬЕ.

Количественное изучение гранулометрии почв под злаковыми лугами. Параметры гранулометрии в связи с физическим составом почвы и корневой системы.

Определив прежде всего, параметры гранулометрии как общее процентное содержание элементов структуры с размерами меньше 10-ти мм (T_{10}), полученных в результате тестов с применением спирта, и средние размеры гранул ∅, в данной работе приводятся соотношения существую-

щие между этими параметрами и некоторыми другими характерностями системы почва — корни (процентное содержание глины, соотношение глина/суглинок A/L, емкость обмена, процентное содержание органического вещества M.O., процент потенциального набухания, об'емная длинна корней L, показатель прочности структуры).

Анализ этих соотношений принимает во вниманиа два главных аспекта гранулометрии : степень развития и мелкозернистости, представленные соответственно T_{10} и $\varnothing$. Рассчет линейной корреляции с превращением переменных, или без него, показывает что соотношения эти неодинаковы для двух наблюдаемых зернистых структур.

Главным выводом данного исследования является выявление ведущей роли органического вещества в большинстве из аспектов грану лометрии. Работа эта позволила также подтвердить некоторые заметки вытекающие из пред'идущих изучений, в частности, о существовании двух разных типов зернистых структур, и гипотезу о динамике гранулометрии нормальных почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arca M. H., Weed S. B., 1966. Soil aggregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. *Soil Sci.* **101** (3), 1964-170.

Bui Huu Tri, 1968. Dynamique de la granulation du sol sous prairie. *Ann. agron.*, **19** (4), 415-439.

Bui Huu Tri, 1969. *Dynamique de la granulation du sol sous prairie.* Thèse Doct. ès Sci., Paris.

Bui Huu Tri, Monnier G., 1973. Étude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. I. Paramètres définissant la structure granulaire et leur relation avec la porosité du sol. *Ann. agron.* **24** (4), 401-424.

Hénin S., Bosquet, 1964. Relation entre le comportement des sols (effritement-fissuration) et leur texture. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 842-846.

Monnier G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse Doct. Ing., Paris.

Osty P. L., 1971. Essai de quantification de l'aptitude à la fissuration de terres très argileuses. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 75-87.

Ann. agron., 1973, **24** (6), 679-688.

ÉCOLOGIE MICROBIENNE DES SOLS DU MAROC

II. — Simulation digitale de la migration hivernale des nitrates

C. CHIANG, F. MOUGENOT, F. DUPRET et L. GERMAIN

Institut agronomique Hassan II,
Rabat, Maroc

RÉSUMÉ

L'objet de cette note est de montrer qu'un modèle mathématique très simple du mouvement des sels dans le profil peut être utilisé pour prévoir la migration de l'azote nitrique avec une précision suffisante pour autant que les interactions des nitrates avec le sol ne soient pas considérées.

La validité du modèle a été vérifiée en le confrontant avec les résultats expérimentaux obtenus en région toulousaine et au Nigeria.

L'accord entre les prédictions du modèle et l'expérience est suffisamment bon, surtout sous climat méditerranéen. Ainsi, la vitesse moyenne théorique du déplacement du nitrate (2,5 mm/mm de pluie) concorde avec les valeurs présentées par divers auteurs.

L'utilisation pratique du modèle consiste à calculer la corrélation inverse entre la profondeur à laquelle les pluies percolantes d'hiver entraînent les nitrates et le rendement de trois céréales dans trois régions du Maroc.

Cette corrélation inverse ne se manifeste qu'à partir d'un certain seuil de pluviosité : le maximum de production des céréales s'observe pour une profondeur de pénétration du front de l'onde nitrique correspondant à une pluviométrie qui ne dépasse pas 150 à 200 mm.

I. — INTRODUCTION

Nous avons montré dans un travail récent (Chiang, Sinnaeve et Dubuisson, 1972) que le maximum de la production des nitrates dans les sols du Maroc coïncidait avec le retour des pluies d'automne après la sécheresse de l'été.

Cette production se ralentit considérablement lorsque la température s'abaisse au cours de la période hivernale et surtout après la disparition de l'effet de stérilisation partielle dû à la dessiccation du sol.

Parallèlement à cette diminution de la production, la réhumectation de la couche arable jusqu'à la capacité en champ a pour effet que les pluies hivernales deviennent

percolantes et que le nitrate est entraîné vers le bas du profil. Cette allure générale du phénomène a déjà été établie par DROUINEAU et MULLER (1961) lors de l'étude sur l'évolution saisonnière des phénomènes de minéralisation et de nitrification dans des sols provençaux.

L'entraînement des nitrates par les pluies hivernales peut les amener hors de la portée des racines de la plante annuelle cultivée et ralentir ainsi son développement. Il faut reconnaître que ce problème, quelle que soit son importance fondamentale n'a suscité qu'un intérêt relativement limité. La raison en est facile à trouver : la correction d'une déficience en azote minéral après un hiver froid et pluvieux se fait très simplement par une application en couverture et le prix de l'engrais azoté est suffisamment bas pour généraliser la pratique sans tenir compte du potentiel azoté du sol. Il n'en est plus tout à fait de même aujourd'hui : sur l'une des rives de la Méditerranée existe le souci de réduire au minimum l'eutrophisation des eaux, sur l'autre rive, le souci d'améliorer l'agriculture par un emploi rationnel de l'azote.

Dans un cas comme dans l'autre, le problème se pose de savoir dans quelle mesure une application d'engrais est nécessaire au printemps de façon à compenser la migration hivernale de l'azote nitrique. Le but de cette note sera de montrer qu'un modèle très simple du mouvement des nitrates dans le profil peut être utilisé pour décrire le phénomène avec une précision suffisante. Nous recourrons pour la vérification du modèle aux données déjà anciennes de SOUBIÈS, GADET et MAURY (1952) sur la migration hivernale de l'azote nitrique dans un sol de la région toulousaine, et celles, récentes, de WILD (1972) au Nigeria. Nous utiliserons ensuite les prédictions du modèle pour rechercher une corrélation inverse éventuelle entre la profondeur d'entraînement des nitrates et le rendement des céréales.

II. — MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Méthode de calcul

Nous avons choisi le modèle décrit par BRESLER (1967), dont les traits essentiels sont les suivants : on applique, à une couche de sol d'épaisseur suffisamment petite, le principe de la conservation de la quantité de nitrate. La quantité de nitrate apportée par l'eau d'infiltration moins celle qui est enlevée par l'eau de drainage doit être égale à la variation de concentration en nitrate dans la couche considérée multipliée par la quantité d'eau qu'elle contient au moment du drainage :

$$VC - V_d C_d = (C_1 - C_0)\,\theta\Delta X$$

où V est la hauteur de pluie de concentration C percolant à travers la couche d'épaisseur ΔX et de teneur volumique en eau θ et où les concentrations en nitrates après et avant les pluies sont C_1 et C_0 ; V_d et C_d sont les volume et concentration en nitrate de l'eau drainée de la couche considérée.

L'utilisation pratique de cette formule suppose que l'on connaisse θ, teneur en eau de la couche au moment du drainage vers la couche inférieure. Nous verrons que l'estimation de θ ne présente pas de difficulté majeure. Il n'en est pas de même pour C_d, concentration en nitrate de l'eau drainée d'une couche à la suivante. Il est nécessaire de faire une hypothèse sur la relation entre C_d, C_1 et C_0. Il est clair que la concentration de l'eau de drainage sera comprise entre C_0 et C_1. En effet, pour $V_d \ll \theta\Delta X$, on a $C_d \sim C_0$ et pour $V_d \gg \theta\Delta X$, on a $C_d = C_1$.

On peut supposer que :

$$C_d = \frac{C_0 + C_1}{2}$$

(concentration moyenne de la solution drainée),

pour autant que le volume d'eau qui a traversé la couche ne soit pas trop grand. Si l'eau percolante déplaçait devant elle la solution du sol sans mélange avec celle-ci, à la manière d'un piston, on aurait après le passage d'une quantité d'eau $V_d = \theta\Delta X$, l'égalité $C_d = C_1$. Il n'en est évidemment pas ainsi et les phénomènes de dispersion hydrodynamique font qu'une quantité d'eau supérieure à $\theta\Delta X$ doit être déplacée avant que la concentration de la solution du sol ne devienne égale à celle de l'eau de percolation. On choisit comme limite $V_d = 2\theta\Delta X$. On a ainsi :

$$C_d = \frac{C_0 + C_1}{2} \text{ pour } V_d \leqslant 2\theta\Delta X \tag{1}$$

$$C_d = C_1 \qquad \text{pour } V_d > 2\theta\Delta X \tag{2}$$

Le calcul peut maintenant se faire en tenant compte du fait que $V_d = V - E$, où E est la différence entre la capacité en champ et l'humidité initiale. On supposera que $V - E = o$ si $V < E$.

On considère implicitement qu'il n'y a ni blocage, ni libération, ni perte d'azote à l'état gazeux ; en d'autres termes, qu'il n'y a pas d'interaction entre le nitrate et le sol. On suppose d'autre part que le mouvement est convectif et monodimensionnel.

Les deux équations ci-dessus peuvent être appliquées à un très grand nombre de couches théoriques en lesquelles on a divisé le profil aux fins de calcul. On utilisera l'indice i pour la profondeur de la couche et j pour les pluies successives, C_{ij} sera ainsi la concentration en nitrate de la couche i après la $j^{ième}$ pluie.

V_j et C_j représenteront la hauteur de la $j^{ième}$ pluie dont la concentration en nitrate avait la valeur $C_j.E_{ij}$ représentera le déficit par rapport à la capacité en champ avant l'irrigation j dans la couche i.

La teneur à laquelle une couche « déborde » dans la suivante aura le symbole $\theta(i)$ et pourra donc varier d'une couche à une autre étant donné l'hétérogénéité du profil.

On a ainsi pour :

$$V_d(i, j) < 2\theta(i) \cdot \Delta X$$

$$V_jC_j - \sum_{k=1}^{i-1} (C_{k,j} - C_{k,j-1})\,\theta(k)\Delta X - (V_j - \sum_{k=1}^{i} E_{k,j})\,\frac{C_{i,j-1} + C_{i,j}}{2} = (C_{i,j} - C_{i,j-1})\,\theta(i)\cdot\Delta X \tag{3}$$

Si on a d'autre part :

$$V_d(i, j) > 2\,\theta(i) \cdot \Delta X$$

$$V_jC_j - \sum_{k=1}^{i-1} (C_{k,j} - C_{k,j-1})\;\theta(k) \cdot \Delta X - 2\theta(i) \cdot \Delta X\,\frac{C_{i,j-1} + C_{i,j}}{2}$$

$$-\left(V_j - \sum_{k=1}^{i} E_{k,j} - 2\theta(i) \cdot \Delta X\right) C_{i,j} = (C_{i,j} - C_{i,j-1})\,\theta(i)\,\Delta X \tag{4}$$

Ces équations peuvent être condensées en groupant les termes en $(C_{k,j} - C_{k,j-1})$. On obtient alors pour le premier cas :

$$V_jC_j - \left(V_j - \sum_{k=1}^{i} E_{k,j}\right)\frac{C_{i,j-1} + C_{i,j}}{2} = \sum_{k=1}^{i} (C_{k,j} - C_{k,j-1})\,\theta(k) \cdot \Delta X$$

et pour le second :

$$V_jC_j - 2\theta(i) \cdot \Delta X\,\frac{C_{i,j-1} + C_{i,j}}{2} - (V_j - \sum_{k=1}^{i} E_{k,j} - 2\theta(i) \cdot \Delta X)C_{i,j}$$

$$= \sum_{k=1}^{i} (C_{k,j} - C_{k,j-1})\,\theta(k)\cdot\Delta X$$

Les équations (3) et (4) sont des relations de récurrence qui permettent de calculer $C(i, j)$ en prenant comme valeurs initiales C_j, concentration en nitrate de l'eau de pluie (1) et $C(i,j)$ teneur en nitrate de chaque couche avant la première pluie.

L'avantage du modèle qui vient d'être décrit, réside dans son extrême simplicité, laquelle se traduit par des exigences très limitées en ce qui concerne la connaissance des paramètres du sol auquel on désire l'appliquer. Il est nécessaire de connaître le déficit d'eau du profil causé par l'évapotranspiration entre chaque pluie, ($E_{k,j}$) des formules (3), (4) ; le paramètre $\theta(i)$ est théoriquement équivalent à la teneur en eau à la saturation, l'expérience montre qu'il en est, en effet, très voisin. Il est plus logique de le considérer comme un paramètre ajustable, dont une première estimation est faite à partir de la teneur en eau à la saturation, ou bien si cette détermination n'est pas disponible, d'une relation empirique entre la texture et la capacité à la saturation.

Il est évidemment indispensable de disposer de la pluviométrie hivernale (symbolisée par V_j), sa concentration en nitrate C_j est pratiquement négligeable puisque l'apport annuel de nitrate n'est en moyenne que de cinq kg d'azote à l'ha. Il est en outre nécessaire de disposer du profil nitrique en début de période hivernale pour disposer d'un point de départ des calculs.

Si l'on se limite à utiliser le modèle pendant la période hivernale, l'évapotranspiration ne représentera qu'une fraction relativement faible des précipitations et le déficit du profil se limitera à sa partie superficielle. La pluviométrie ne doit pas être connue de façon détaillée, il suffit de disposer de la hauteur des précipitations par pentade ou même par décade. Les propriétés mathématiques du modèle sont telles que le fractionnement d'une hauteur donnée de pluie cesse rapidement d'exercer une influence sur le mouvement des nitrates.

L'objection la plus sérieuse que l'on puisse faire à l'utilisation de ce modèle est que le principe de la conservation des nitrates qui est à sa base suppose qu'il n'y a ni production par minéralisation et nitrification, ni perte par dénitrification. On pouvait toutefois espérer qu'en période hivernale, seulement, ces limitations n'en réduisent pas trop l'utilité.

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans un premier temps, le modèle a été appliqué aux résultats expérimentaux obtenus par SOUBIÈS, GADET et MAURY (1952) sur la migration hivernale de l'azote dans un sol limoneux de la région toulousaine. Les données fournies comportaient l'analyse mécanique, le profil initial en nitrate le 1er décembre et son évolution jusqu'au 4 mai. Nous n'avons utilisé que les deux premiers profils expérimentaux (jusqu'au 19 janvier), puisqu'après cette date, la crête de l'onde nitrique avait dépassé la limite inférieure du profil. Suivant les indications des auteurs, le sol était en équilibre hydrique au 1er décembre, date à laquelle les cases lysimétriques commencèrent à débiter faiblement. On peut donc poser que les $E_{i,j}$ de la formule (3) ou (4) sont pratiquement nuls pendant la période étudiée. La valeur $\theta(i)$ pour les 5 couches étudiées a été ajustée à (de haut en bas) 33, 24, 20, 14 et 10 p. 100 en poids.

Les auteurs ne fournissaient que la pluviométrie totale entre les prélèvements successifs, soit deux valeurs que nous avons fractionnées arbitrairement en 6 pluies d'environ 20 mm chacune.

Comme nous l'avons indiqué, un fractionnement plus important encore de la précipitation totale n'augmentait pas le degré de lessivage du nitrate. Les profils théoriques calculés à partir du profil initial et de la pluviométrie sont présentés à la figure 1 avec les résultats expérimentaux affectés de leur erreur standard. Compte tenu de celle-ci, l'accord peut être considéré comme suffisamment bon.

La vitesse moyenne de progression de l'onde nitrique dans le profil étudié peut donc être évaluée à 2,5 mm par mm de pluie. Cette estimation est dans le domaine

(1) On estime l'apport par les eaux de pluie à 5 kg ha^{-1} an^{-1} N (NO_3^-) (MEYER et PAMPFER, 1959; VENEMA, 1961), ce qui, pour une pluviométrie moyenne de 550 mm an^{-1}, correspond à 0,909 mgl^{-1}.

des variations observées pour le phénomène par divers auteurs, qui ont proposé des rapports variant de 1 à 4 (OLSEN *et al.*, 1970 ; LEVIN, 1964 ; SHAW, 1962 ; WETSELAAR, 1962). SOUBIÈS, GADET et MAURY (1952) avaient calculé à partir de leurs données expérimentales des valeurs comparables (de 2,4 à 4,9). Un travail récent de WILD (1972) au Nigeria mentionne des rapports beaucoup plus faibles allant de 0,3 à 0,7, avec une moyenne de 0,5.

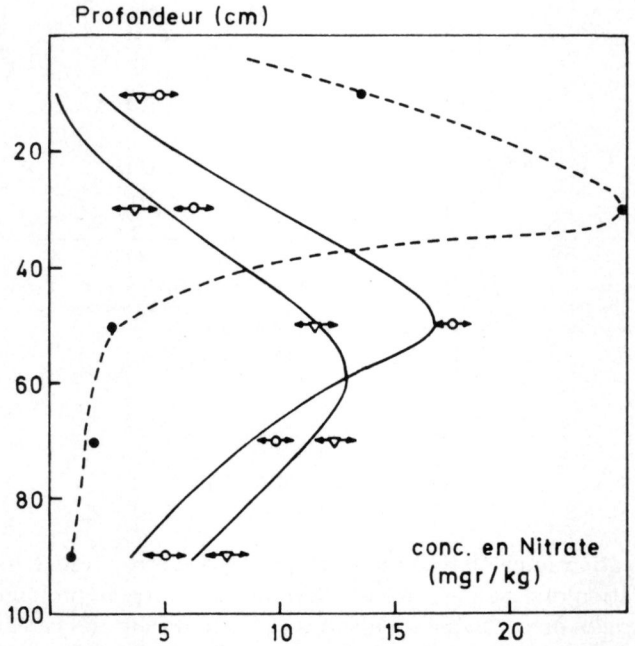


FIG. 1. — *Comparaison entre les profils de concentration en nitrate* (courbes en trait plein) *calculés à partir de la courbe observée* (en trait interrompu) *le 1-12-50 et les profils observés le 5-1-51*(○) *et le 19-1-51* (△) *après 85,0* et *37,1 mm de pluie.*

D'après les données de SOUBIÈS *et al.* (1952) pour la région toulousaine

Il était peu probable que les données présentées par ce dernier auteur soient susceptibles d'un calcul théorique, étant donné le peu de vraisemblance de l'hypothèse de base (absence d'interaction des nitrates avec le sol) sous le climat du Nigeria.

Il nous a semblé intéressant d'effectuer le calcul lorsque les observations présentées par l'auteur s'étendaient à des périodes suffisamment courtes. La figure 2 montre que la théorie permet de prévoir de façon relativement satisfaisante le mouvement des nitrates pour une période de 14 jours en août 1969, mais ne le permet pas pour une période de 40 jours, en septembre et octobre 1970. Les hauteurs des précipitations étant très comparables pour les deux périodes (125 et 116 mm). Ces quantités ont été fractionnées en 4 pluies successives. Les conditions de température au Nigeria sont donc telles que, comme on pouvait s'en douter, les interactions des nitrates avec le sol (dénitrification) réduisent à néant l'utilité du modèle pour des périodes supérieures à dix jours.

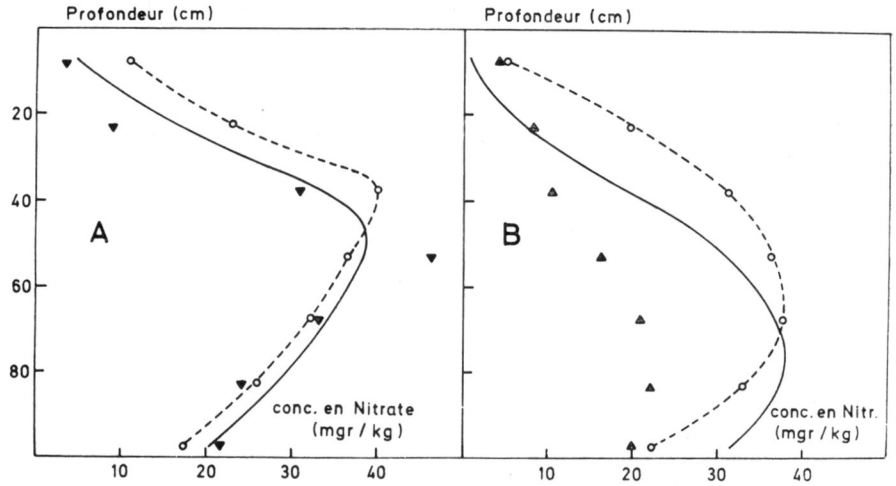


FIG. 2. — *Comparaison entre les profils de concentration en nitrate* (courbes en trait plein) *calculés à partir de la courbe expérimentale* (en trait interrompu) *et les données expérimentales après 14 jours* (A) *en août 69 ou 40 jours en septembre 70* (B) *pour un sol nu au Nigeria.*

D'après les données de WILD (1972)

IV. — APPLICATION

Une application immédiate du modèle qui vient d'être présenté consiste à examiner la corrélation inverse qui pourrait être observée entre la profondeur à laquelle les pluies hivernales ont entraîné les nitrates et le rendement des céréales.

Il est clair que cette corrélation inverse, si elle existe, ne peut se manifester qu'à partir d'un certain seuil de pluviosité ; seuil qui correspondrait à un rendement maximum pour la plante. En effet, en deçà de ce seuil, la baisse de rendement est liée au degré de sécheresse du sol tandis qu'au-delà, elle dépend de la vitesse d'entraînement des nitrates.

Nous avons porté sur la figure 3 la relation observée entre le rendement de 3 céréales et la profondeur à laquelle les pluies hivernales avaient entraîné les nitrates, dans trois régions du Maroc, au cours de 5 années successives. Le calcul de cette profondeur a été fait en se donnant comme paramètres 1,4 g/cm³ pour la densité apparente et en supposant que le déficit en eau du sol par rapport à la capacité en champ était nul au début de la période considérée.

Il en est probablement ainsi pour la plupart des sols de la plaine atlantique du Maroc, comme le montre la figure 4 sur laquelle nous avons porté la teneur en eau observée au moyen d'une sonde à neutrons et les précipitations observées pour la période hivernale 1971-72, à Rabat.

Pour amorcer le calcul du mouvement des nitrates dans le profil, nous avons considéré que la teneur en azote nitrique était de 35 p.p.m. dans la couche arable (0-30 cm) et nulle pour les horizons inférieurs. La valeur choisie pour la concentration initiale nous était suggérée par nos travaux antérieurs en la matière (CHIANG,

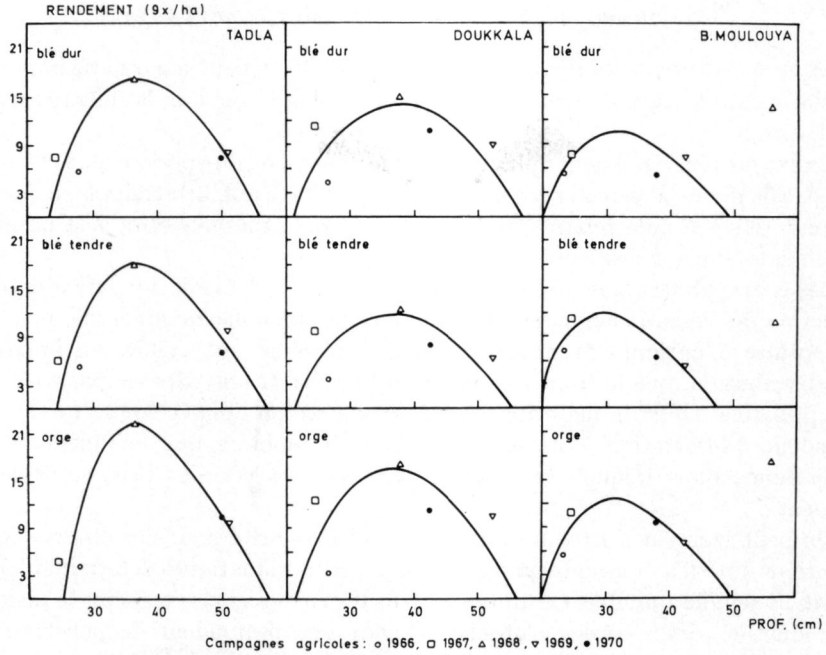


FIG. 3. — *Relation entre la pluviométrie des mois d'hiver* (mi-novembre à mi-février) *calculée en profondeur d'entraînement des nitrates et le rendement de 3 céréales pour 3 régions du Maroc*

Sources : Service des statistiques et enquêtes agricoles, Royaume du Maroc (Secrétariat d'État chargé du Plan), et Ministère de l'Agriculture et de la Réforme agraire. Direction de la Mise en Valeur. Rabat, Maroc.

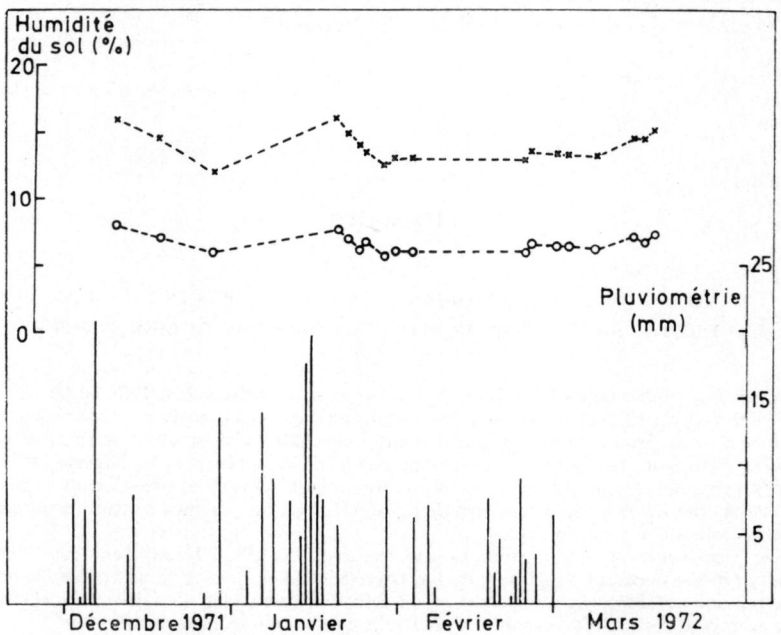


FIG. 4. — *Évolution de la teneur en eau du sol à 30(○) et 60 cm (×) en fonction de la pluviométrie au cours de l'hiver 1971-1972 à Rabat*

SINNAEVE et DUBUISSON, 1972). Il est clair que cette valeur n'a qu'une importance secondaire dans le cas qui nous occupe, étant donné la façon dont les nitrates migrent dans le profil.

Enfin, les renseignements pluviométriques dont nous disposions ont été utilisés pour le calcul de la percolation des nitrates, en divisant arbitrairement en deux fractions égales la cote relative à chaque mois, de la mi-novembre à la mi-février, pour chaque année considérée.

Les 9 graphiques ainsi obtenus montrent, comme il fallait s'y attendre, que la production des céréales augmente d'abord avec la pluviométrie hivernale pour diminuer ensuite. L'optimum étant atteint lorsque les pluies sont telles, en importance et en distribution, que le front de migration des nitrates ne dépasse pas 20 à 30 cm. Il est probable que si la majorité des sols d'une région donnée sont superficiels, la profondeur d'infiltration à ne pas dépasser sera moindre que lorsque l'on a des sols profonds dans lesquels le système racinaire des céréales peut se développer librement.

On peut bien sûr s'attendre à une parfaite régularité pour des observations de ce genre où l'on n'a considéré qu'un seul des facteurs climatiques déterminant le rendement. Il semble toutefois certain que, dans les trois régions étudiées, le maximum de production des céréales s'observera pour une profondeur de pénétration du front de l'azote nitrique correspondant à une pluviométrie globale de 150 à 200 mm.

On dispose ainsi d'une méthode qui permettrait de juger de l'opportunité d'un apport en couverture d'engrais azoté lorsque l'influence des pluies d'hiver aura été calculée. La méthode qui vient d'être proposée pourrait évidemment être mieux adaptée à une région donnée, en tenant compte de la capacité de rétention en eau et de l'épaisseur des sols qui y sont les plus répandus.

Reçu pour publication en avril 1973.

SUMMARY

II. — DIGITAL MICROBIAL ECOLOGY OF SOILS IN MOROCCO.
DIGITAL SIMULATION OF NITRATE MIGRATION DURING WINTER

The purpose of this paper is to show that a very simple mathematical model for the movement of salts in the soil profile may be used for describing the leaching of soil nitrate when reactions in which nitrate is produced or disappeared are negligible. The validity of the model has been tested with data from the winter period obtained in S. W. France or in Nigeria. When interactions are negligible *i. e.* in the cold season or for a short period of observation, the agreement is fairly good, the average displacement being about 2.5 mm per mm of rain in agreement with the observations of several authors.

A practical example of the utilization of the model is given by studying the inverse correlation between the depth at which nitrate has been leached by winter rains and the yield of cereals in three regions of Morocco. Obviously, yield and winter rainfall are inversely correlated only above a certain threshold corresponding to about 150 to 200 mm of rain.

ZUSAMMENFASSUNG

BAKTERIELLE ÖKOLOGIE DES BODENS IN MAROKKO
II. — DIGITALSIMULIERUNG DER WINTERWANDERUNG DES NITRATS

Gegenstand dieser Notiz ist es zu zeigen, dass ein sehr einfaches mathematisches Modell der Salzbewegung im Profil angewendet werden kann, um die Wanderung des Nitratstickstoffs mit hinreichender Genauigkeit vorauszusehen, insofern die Wechselwirkungen der Nitrate mit dem Boden nicht in Betracht gezogen werden.

Die Gültigkeit des Modells wurde dadurch überprüft, dass es mit den Versuchsergebnissen der Toulouser Gegend und in Nigerien verglichen wurde.

Die Übereinstimmung zwischen den Voraussagen des Modells und der Praxis ist hinreichend, besonders im Mittelmeerklima. So stimmt die theoretische Durchschnittsgeschwindigkeit der Nitratwanderung (2,5 mm/mm Regen) mit den von verschiedenen Autoren angeführten Werten überein.

Die praktische Anwendung des Modells besteht darin, dass man das umgekehrte Verhältnis zwischen der Tiefe, an welche Wintersickerregen die Nitrate mitbefördern, und dem Ertrag von drei Getreidesorten in drei Gegenden von Marokko berechnet.

Dieses umgekehrte Verhältnis gilt ab einer gewissen Regentätigkeitsschwelle. Das Getreideproduktionsmaximum wird bei einer Eindringtiefe der Frontseite der Nitratwelle beobachtet, die einer Regenmenge von nicht mehr als 150 bis 200 mm entspricht.

РЕЗЮМЕ

К. ЧИАНГ, Ф. МУЖЕНО, Ф. ДЮПРЕ, Л. ЖЕРМЕН.

Микробиологическая экология мароканских почв.
Симулирование зимней миграции нитрата.

В данной работе дается об'яснение очень простой математической модели движения солей по профилю, применяющейся для прогноза миграции нитратного азота, достаточно точной, несмотря на то что взаимодействие нитратов с почвой не принимается во внимание.

Годность данной модели была проверена при помощи сравнения результатов ее применения, с результатами экспериментов проведенных в районе Тулузы и в Нигерии. Согласованность между прогнозом модели и результатами опытов достаточно хороша, особенно в Средиземноморском климате. Так, например, средняя теоретическая скорость передвижения нитрата (2,5 мм/мм осадков) совпадает с величинами указывавшимися различными авторами.

Практическое применение модели состоит в рассчете обратной корреляции между глубиной на которую зимние проливные дожди увлекают нитраты, и продуктивностью трех культур злаков в трех различных районах Марокко.

Эта обратная корреляция проявляется только при достижении некоторого порога дождливости : максимальная продукция злаков наблюдается при глубине проникания нитратной волны, соответствующей дождливости не превышающей 150 — 200 мм.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRESLER R., 1967. A model for tracing salt distribution in the soil profile and estimating the efficient combination of water quality and quantity under varying field conditions. *Soil Sci.*, **104**, 227-233.

CHIANG C., SINNAEVE J., DUBUISSON G., 1972. Écologie microbienne des sols du Maroc. I. Fluctuations saisonnières. *Ann. Inst. Pasteur*, **122**, 1171-1182.

DROUINEAU G., MULLER J., 1961. Dix ans d'études sur l'évolution de l'azote minéral dans un sol du midi de la France. *Agrochim.*, **3**, 272-279.

LEVIN I., 1964. Movement of added nitrates through soil columns and undisturbed soil profiles. *Trans. VIIIth Int. Cong. Soil Sci.*, **4**, 1011-1022.

MEYER J., PAMPFER E., 1959. Nitrogen content of rain water collected in the humid central Congo basin. *Nature*, Lond., **184**, 717-718.

OLSEN R. J., HENSLER R. F., ATTOE O. J., WITZEL S. A., PETERSON L. A., 1970. Fertilizer nitrogen and crop rotation in relation to movement of nitrate through soil profiles. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **34**, 448-54.

SHAW K., 1962. Loss of mineral nitrogen from soil. *J. Agric. Sci. Camb.*, **58**, 145-151.

SOUBIÈS L., GADET R., MAURY P., 1952. Migration hivernale de l'azote nitrique dans un sol limoneux de la région toulousaine. *Ann. agron.*, **111**, 365-383.

VENEMA K. C. Q., 1961. Some notes regarding the nitrate and ammonia content of tropical rains and that of a number of tropical soils. Part. I. *Potash trop. Agric.* **4**, 19-39.

WETSELAAR R., 1962. Nitrate distribution in tropical soils. III. Downward movement and accumulation of nitrate in the subsoil. *Plant and Soil*, **16**, 19-31.

WILD A., 1972. Nitrate leaching under bare fallow at a site in Northern Nigeria. *J. Soil Sci.*, **23**, 315-324.

Ann. agron., 1973, **24** (6), 689-705.

ÉTUDE DE LA COMPÉTITION EN SERRE ENTRE LE BLÉ D'HIVER ET UNE ADVENTICE PRÉCOCE (*VERONICA HEDERAEFOLIA* L.)

J.-P. CAUSSANEL, D. CLAIR et G. BARRALIS

Laboratoire de Malherbologie,
Centre de Recherches de Dijon, I. N. R. A.,
Domaine d'Époisses, Bretenières,
21110 Genlis

RÉSUMÉ

La véronique à feuilles de lierre (*Veronica hederaefolia* L.) se rencontre fréquemment dans les cultures de blé d'hiver, où ses caractéristiques écologiques, biologiques et physiologiques en font une adventice importante.

L'étude de la compétition qui existe entre cette mauvaise herbe et la variété de blé d'hiver *Prieur* a été entreprise pendant deux ans dans des expériences en vases de végétation.

Dans la première série d'essais, on a étudié l'effet de deux facteurs du milieu, azote et humidité du sol, sur la compétition qui s'exerce entre les deux plantes, lorsque la densité de véroniques varie pour une même densité de blé. Ces essais ont été conduits jusqu'au tallage du blé. Pour chaque facteur étudié, l'analyse statistique des essais a mis en évidence les résultats suivants :

— une réduction importante du nombre de talles de blé et de leur hauteur lorsque la densité de véroniques atteint 115 plantes par mètre carré ;

— aucun effet de la fumure azotée, telle qu'elle fut apportée, sur le tallage du blé ;

— une réduction du tallage lorsque l'humidité est insuffisante, mais l'effet observé dépend à la fois de la densité de véroniques et de la période pendant laquelle la sécheresse est maintenue.

Dans la seconde série d'essais, l'étude de la compétition entre ces mêmes espèces a été poursuivie jusqu'à la récolte du blé. Si l'on a pu retrouver une densité critique de véroniques voisine de la précédente à partir de laquelle on observe une réduction du tallage, il semble qu'après le tallage, le blé récupère son retard, puisque le rendement en grains n'est pas significativement réduit par la présence de véroniques jusqu'à la densité étudiée, soit 400 plantes par mètre carré.

I. — INTRODUCTION

Parmi les adventices à germination d'automne, la véronique à feuilles de lierre, *Veronica hederaefolia* L. est l'une des plus fréquentes dans les céréales d'hiver. Elle germe de novembre à février, commence à fleurir dès le mois de mai et fructifie en

juin. La durée très courte de son cycle biologique et son appareil végétatif rampant ne lui font accorder généralement que peu d'importance visuelle.

Pourtant, les relevés phytosociologiques faits par BARRALIS (1969) en Côte-d'Or, lui ont permis de classer cette espèce parmi les dominantes des céréales d'hiver au mois d'avril. Plusieurs caractères biologiques et physiologiques en font en effet une plante particulièrement bien adaptée aux conditions de culture du blé d'hiver :

— sa profondeur de germination élevée, supérieure à 7 cm (CHANCELLOR, 1964) ;
— sa croissance favorisée par une forte fumure et par un travail du sol soigné (WEIGERT et WEIZEL, 1937) ;
— sa résistance au froid, indépendante de son stade de développement (RADEMACHER, 1963) ;
— sa reprise de végétation rapide au printemps, plus précoce que celle du blé d'hiver (WEIGERT et WEIZEL, 1937) ;
— son cycle de développement rapide qui lui permet de disséminer ses semences bien avant la récolte du blé (BARRALIS, 1969).

WEIGERT et WEIZEL en particulier ont longuement étudié en Bavière les phénomènes de compétition auxquels donnent lieu dans les céréales différents peuplements naturels de mauvaises herbes où *Veronica hederaefolia* L. était l'adventice principale. Ils ont démontré qu'une plante de véronique prélève au moins autant d'azote et d'eau qu'une plante de blé d'hiver, et qu'un peuplement d'environ 50 à 60 plantes de véronique par mètre carré peut prélever 3 à 4 fois plus d'azote sur une parcelle recevant 60 kg/ha d'azote que sur une parcelle ne recevant aucune dose d'azote.

Depuis quelques années, la progression de cette espèce à germination précoce et à développement rapide dans les blés d'hiver serait due, d'après BARRALIS (1965), au remplacement comme tête d'assolement de la betterave par le colza, culture non sarclée et qui permet un semis plus précoce du blé.

Il a donc paru intéressant d'étudier, par des essais en vases de végétation, la compétition entre le blé d'hiver et la véronique à feuilles de lierre, lorsque varie la densité de cette dernière. Les essais se sont poursuivis pendant deux ans (1969 à 1971) :

La première année, les expériences ont été conduites en serre climatisée, sans éclairage d'appoint, jusqu'au stade fin tallage du blé, en petits vases de végétation. Elles ont eu pour but principal de préciser l'influence de deux facteurs du milieu (azote et eau) sur la compétition.

Dans l'expérience de compétition pour l'azote, l'effet sur la croissance du blé, de cinq doses d'azote (N_0, N_1, N_2, N_3, N_4) comprises entre 62,5 mg et 87,5 mg d'azote par kg de terre, a été étudié pour quatre densités de véronique (D_0, D_1, D_2, D_3) comprises entre 0 et 230 plantes /mètre carré.

Dans l'expérience de compétition pour l'eau, l'effet sur la croissance du blé, des trois régimes hydriques H_0, H_1, H_2 donnés dans le paragraphe II, 3-2, a été étudié pour les mêmes densités de véronique (D_0, D_1, D_2, D_3).

La seconde année, les expériences ont été reprises en serre plastique froide, sans éclairage d'appoint, jusqu'à la récolte du blé, en vases de végétation de Burgevin. Seule, l'influence de la densité sur la croissance et sur le rendement du blé a été étudiée : l'effet de la compétition a été suivi pour six densités de véronique

(D_0, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5) comprises entre 0 et 400 plantes/mètre carré, vis-à-vis d'un seul peuplement de blé de densité D_4 (267 plantes/mètre carré). La dose d'azote (25 mg/kg de terre) et le régime hydrique H_0 furent identiques dans chaque vase.

II. — MÉTHODES ET TECHNIQUES

1. — *Méthode de culture en vases de végétation*

Deux sortes de récipients de culture ont été utilisés : la première année, des cultipots en matière plastique, la seconde année, des vases de Burgevin, en tôle galvanisée, de forme cylindrique. Leurs dimensions respectives étaient les suivantes :

	Cultipots	*Vases de Burgevin*
Hauteur	18 cm	28 cm
Surface	340 cm^2	450 cm^2
Volume	4 dm^3	13 dm^3
Poids de terre	4 kg	12 kg

Dans l'expérience de compétition pour l'azote, l'eau de drainage était recueillie dans une soucoupe et reversée ensuite à la partie supérieure, selon le principe des vases de Mitscherlich.

Dans l'expérience de compétition pour l'eau, les cultipots furent obturés à la partie inférieure, et conduits par conséquent comme les vases de Burgevin de l'année suivante.

La terre employée consistait en un mélange de terre et de sable dans les proportions respectives 2/3 1/3. Le sol analysé par la Station d'Agronomie de Dijon était pauvre en azote total (0,95 p. 1 000), en acide phosphorique assimilable (0,05 p. 1 000) et en potasse échangeable (0,20 p. 1000).

Le taux d'humidité fut maintenu entre 70 p. 100 et 100 p. 100 de la capacité de rétention (BURGEVIN, 1938 ; COÏC *et al.*, 1962, 1964 ; KOCHER, 1968). La capacité de rétention fut déterminée empiriquement en mesurant le pourcentage d'eau retenue par la terre des cultipots, après égouttage de 24 heures à l'abri de toute évaporation.

La fumure uniforme, incorporée au sol avant la mise en place des essais, fut par kg de terre de :

— 62,5 mg d'azote sous forme de nitrate de calcium ;
— 212,5 mg de P_2O_5 sous forme de superphosphate de chaux 17 p. 100 ;
— 240,0 mg de K_2O sous forme de sulfate de potasse ;
— 37,0 mg de MgO sous forme de chlorure de magnésium ;
— 5,0 ml d'une solution d'oligo-éléments contenant :

0,900 g/l de SO_4Mn, H_2O
0,445 g/l de SO_4Zn, H_2O
0,625 g/l de SO_4Cu, $5H_2O$
0,400 g/l d'acide borique, H_3BO_3
0,032 g/l de molybdate d'ammonium.

Dans les expériences de compétition pour l'eau et l'azote, des doses d'azote sous forme ammoniaco-nitrique furent apportées comme l'exigeait le protocole expérimental (cf. § II, 3).

2. — *Méthodes et techniques de culture en compétition*

a) *Choix des plantes en compétition.*

La variété de blé choisie a été une variété de blé d'hiver : *Prieur* ; les semences avaient été traitées contre les parasites fongiques.

Les semences de *Veronica hederaefolia* L. utilisées la première année provenaient de récoltes faites en juin 1967 sur les terres de culture du domaine d'Époisses. La seconde année, les plantules ont été directement prélevées en plein champ au stade 2 à 4 feuilles, maintenues en terrines une semaine en serre froide, puis repiquées dans les vases de végétation.

b) *Disposition du blé dans les vases de végétation.*

La première année, pour respecter les conditions de compétition intraspécifiques observées dans la nature, le blé a été semé directement dans les vases de végétation, à raison de 9 plantes par cultipot, en ligne et au même écartement de semis (2 cm) qu'en plein champ. Il n'y a donc eu qu'une seule ligne de blé centrale par vase de végétation, et la densité du blé fut donc de 265 plantes par mètre carré.

La seconde année, le blé a été semé dans les vases de végétation comme le recommande BURGEVIN dans sa méthode, à raison de 12 plantes par vase, à égale distance (3 cm) les unes des autres, sur un cercle dont le diamètre (12 cm) était égal à la moitié de celui des vases de végétation. La densité de blé fut donc également de 265 plantes par mètre carré.

c) *Disposition de l'adventice dans les vases de végétation.*

La densité à laquelle se rencontre *Veronica hederaefolia* L. dans la nature varie généralement entre 30 et 120 plantes au mètre carré dans les parcelles de blé d'hiver, mais ces peuplements sont associés à ceux d'autres adventices.

La première année, les quatre densités suivantes ont été retenues pour *Veronica hederaefolia* L. :

D_0 = 0 plante par vase (0 plante par mètre carré)
D_1 = 2 plantes par vase (57 plantes par mètre carré)
D_2 = 4 plantes par vase (115 plantes par mètre carré)
D_3 = 8 plantes par vase (230 plantes par mètre carré)

Pour chaque densité, les plantes étaient en nombre égal de chaque côté de la ligne de blé.

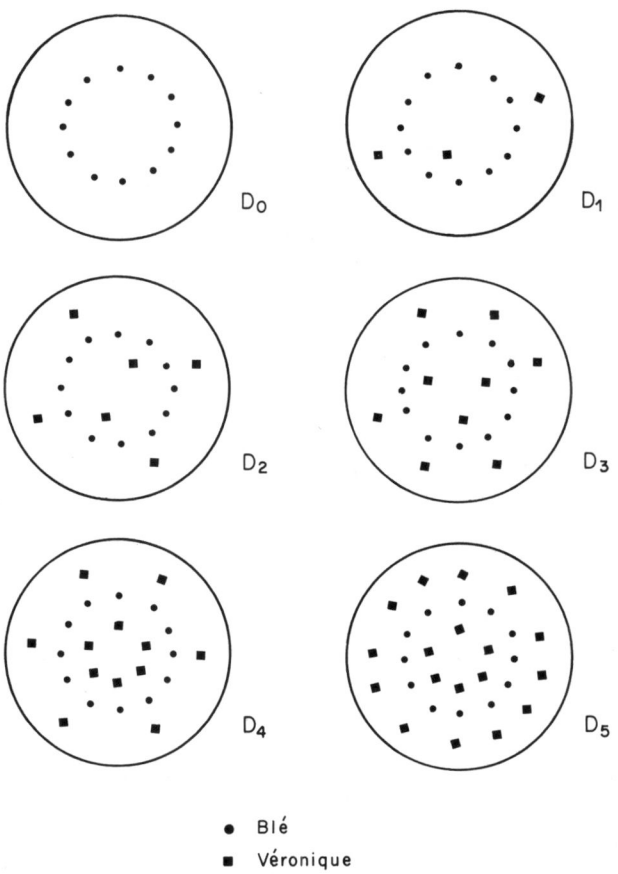


FIG. 1. — *Disposition des plantules de* Veronica hederaefolia *dans les vases de végétation*

La seconde année, l'expérience a été réalisée avec six densités de véronique :

D_0 = 0 plante par vase (0 plante par mètre carré)
D_1 = 3 plantes par vase (67 plantes par mètre carré)
D_2 = 6 plantes par vase (135 plantes par mètre carré)
D_3 = 9 plantes par vase (200 plantes par mètre carré)
D_4 = 12 plantes par vase (267 plantes par mètre carré)
D_5 = 18 plantes par vase (400 plantes par mètre carré)

Pour chaque densité, les plantes étaient disposées comme l'indiquent les schémas de la figure 1.

3. — *Méthodes particulières aux expériences de compétition pour l'azote et pour l'eau*

3. 1. *Expérience de compétition pour l'azote.*

En plein champ, l'étude de la compétition pour l'azote a souvent conduit à des résultats contradictoires. Pour certains auteurs (VENGRIS *et al.*, 1955 ; HAMMERTON, 1967), le pouvoir compétitif des mauvaises herbes dans une culture est augmenté par une forte fumure azotée. Mais dans les céréales, il arrive que l'azote soit moins bien utilisé par les mauvaises herbes (GRANSTROM, 1957 ; THURSTON, 1959).

L'utilisation de vases de végétation qui permet des expériences plus précises a amené des auteurs comme KOCH (1967), KURTH et LINKE (1969) à conclure que le pouvoir de compétition de certaines mauvaises herbes est davantage favorisé par un niveau élevé de fertilisation que celui des céréales, mais que les résultats varient grandement selon l'espèce adventice choisie. Dans la présente expérience de compétition pour l'azote, leur méthode d'expérimentation a été retenue en y introduisant toutefois le fractionnement de la fumure azotée pendant la durée de végétation des plantes comme le préconise LIBOIS (1970) dans son étude de la compétition entre *Lolium perenne* L. et *Festuca pratensis* HUDS..

Tous les vases ont reçu au départ 62,5 mg d'azote par kg de terre. Un apport d'azote a eu lieu trois semaines après la levée du blé, d'où les cinq traitements :

N_0 = 62,5 mg + 0,0 mg = 62,5 mg
N_1 = 62,5 mg + 6,2 mg = 68,7 mg
N_2 = 62,5 mg + 12,5 mg = 75,0 mg
N_3 = 62,5 mg + 18,7 mg = 81,2 mg
N_4 = 62,5 mg + 25,0 mg = 87,5 mg

L'expérience a comporté 6 répétitions et a donc nécessité l'emploi de 120 vases de végétation. Elle a duré 10 semaines, du 14 janvier au 24 mars 1970.

3. 2. *Expérience de compétition pour l'eau.*

En plein champ, des expériences de compétition pour l'eau ont permis d'étudier l'intensité de cette compétition en fonction des espèces qui y participent (SNOY, 1952 ; WELBANK, 1961 ; VAN RIPER, 1964 ; CHANDRA SAXENA, 1965 ; WIESE et VANVIDER, 1970 ; HARRIS et WILSON, 1970). Elles utilisaient le plus souvent l'irrigation pour faire varier l'alimentation hydrique fournie aux plantes (STANIFORTH, 1957 ; ALESSI et POWER, 1970).

Les expériences en vases de végétation ne peuvent s'appliquer aux mêmes sujets d'étude, du fait de la réduction des systèmes racinaires des plantes en profondeur. Mais elles sont particulièrement indiquées dans l'étude des effets physiologiques qu'entraîne un manque d'eau en cours de végétation. Par exemple, KOCHER (1968) travaillant avec trois régimes hydriques différents (normal, sec, normal suivi d'une période de sécheresse) observa une meilleure résistance de l'avoine aux régimes hydriques défavorables par rapport au comportement de *Sinapis arvensis* L. ou d'*Alopecurus myosuroides* HUDS., lorsque les plantes se trouvaient en compétition.

C'est cette dernière méthode qui a été retenue pour étudier l'influence de l'eau dans la compétition entre blé d'hiver et *Veronica hederaefolia* L.

Le premier arrosage a porté tous les cultipots à leur capacité de rétention. Puis les trois traitements suivants ont été appliqués :

1° *traitement* H_0 : taux d'humidité du sol maintenu entre 70 et 100 p. 100 de la capacité de rétention, soit entre 18 et 26 p. 100 du poids de terre sèche, avec apport d'eau chaque fois que le taux d'humidité de la terre atteignait 18 p. 100.

2° *traitement* H_1 : maintien des vases de végétation en régime de sécheresse à un taux d'humidité toujours compris entre la capacité de rétention (26 p. 100) et le point de flétrissement (13 p. 100). Le point de flétrissement de la terre employée fut obtenu par extrapolation à partir des courbes de détermination de l'eau hygroscopique des constituants du mélange utilisé. Les cultipots étaient

ramenés à la capacité de rétention dès que leur poids atteignait la valeur correspondante à celle du point de flétrissement de la terre.

3° *traitement* H_2 : maintien des vases de végétation en régime mixte (H_0 puis H_1), le premier traitement H_0 étant appliqué de la levée au début du tallage, et le second H_1 ensuite, ce qui équivaut à soumettre les plantes à un « coup de sécheresse » au début du tallage.

L'expérience qui a comporté 6 répétitions a nécessité l'emploi de 72 vases de végétation. Elle a duré 11 semaines du 14 janvier au 31 mars 1970. Les quantités d'eau reçues par les plantes pendant l'expérience sont représentées graphiquement dans la figure 2.

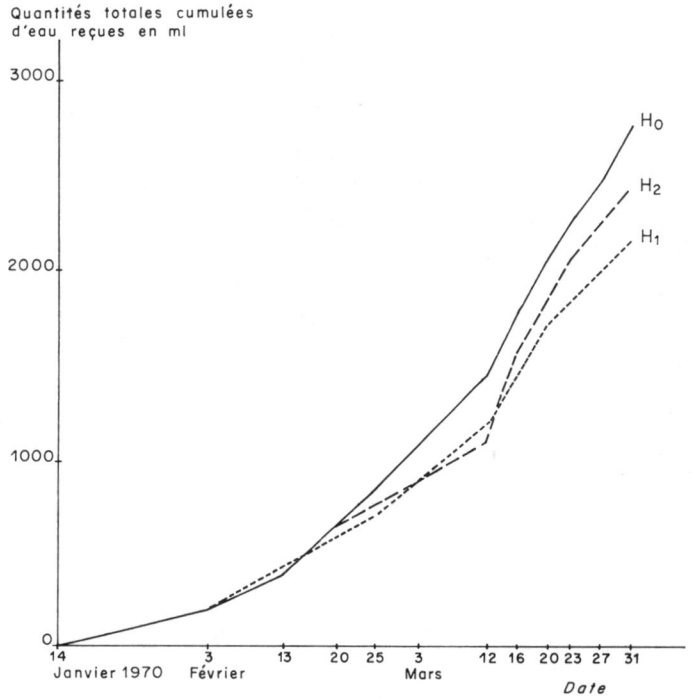


FIG. 2 — *Quantités d'eau reçues par vase de végétation en cours d'expérience*

III. — RÉSULTATS

1. — *Comptages et mensurations*

Pour suivre le développement et la croissance du blé et de la véronique, des comptages et mensurations ont été effectués, toutes les deux semaines, à partir du 29 janvier, dans les expériences de compétition pour l'azote et pour l'eau qui ont eu lieu en serre climatisée (12°C à 15°C) :

a) sur deux répétitions, pour toutes les densités et pour les traitements N_0 et N_4, dans l'expérience de compétition pour l'azote ;

b) sur deux répétitions, pour les traitements H_0, H_1, H_2 dans l'expérience de compétition pour l'eau.

Ces notations ont porté sur :

a) le nombre de feuilles par plante, relevé jusqu'au début du tallage ;

b) le nombre de talles de blé par plante et le nombre de ramifications de véronique par plante ;

c) la hauteur de la première talle de blé par plante.

Enfin, le stade de l'adventice était noté chaque fois. Ces observations et notations sont résumées dans le tableau I.

TABLEAU I

Croissance et développement du blé et de la véronique dans l'expérience de compétition 1969-1970

Date	Essai densité × azote		Essai densité × humidité	
	Blé	Véronique	Blé	Véronique
14-1-1970	Semis	—	Semis	—
19-1-1970	Coléoptile (levée)	—	—	—
21-1-1970	—	—	Coléoptile (levée)	—
29-1-1970	2 feuilles	4 feuilles (repiquage)	—	—
30-1-1970	—	—	1 feuille	5 feuilles (repiquage)
5-2-1970	3 feuilles H = 38 cm	5 feuilles	—	—
6-2-1970	—	—	2 feuilles H = 34 cm	7 feuilles
18-2-1970	1re talle H = 75 cm	9 feuilles 6 à 7 ramifications primaires	—	—
19-2-1970	—	—	4 feuilles 1re talle H = 55 cm	10 feuilles 5 ramifications primaires
5-3-1970	3 talles H = 110 cm	×	—	—
6-3-1970	—	—	3 talles H = 85 cm	×
24-3-1970	D_0N_4 : 4 talles H = 170 cm D_3N_0 : 3 talles H = 125 cm	12 à 15 ramifications primaires ; 3 à 8 ramifications secondaires — Longueur totale des ramifications par plante 150 à 200 cm — 1 à 5 capsules par plante	D_0H_0 : 6 talles D_0H_1 : 6 talles D_0H_2 : 6 talles	7 à 9 ramifications primaires ; 5 à 7 ramifications secondaires ; longueur totale des ramifications 150 à 200 cm — 30 à 40 capsules par plante
31-3-1970	—		D_3H_0 : 5 talles D_3H_1 : 5 talles D_3H_2 : 4 talles	

Dans l'expérience de compétition qui a eu lieu la seconde année en serre plastique froide et qui a duré huit mois, du 21 octobre 1970 au 18 juin 1971, les comptages ont porté sur :

a) le nombre de feuilles par plante, relevé jusqu'au début du tallage ;

b) le nombre de talles de blé par plante ;

c) le nombre d'épis de blé par plante.

Ces observations et notations sont résumées dans le tableau 2.

TABLEAU 2

Croissance et développement du blé dans l'expérience de compétition 1970-1971

Date	Blé
21-10-1970	Semis
2-11-1970	Coléoptile (levée)
10-11-1970	2 feuilles
24-11-1970	3 feuilles — 1re talle
8-12-1970	2 talles par plante
16-03-1971	Plein tallage : 7 talles par plante
6-04-1971	Montaison : Témoin D_1 D_2 environ 6 talles D_3 D_4 D_6 environ 5 talles
20-04-1971	Épiaison : Témoin D_1 D_2 : 22 à 25 talles/10 plantes — 1 à 2 épis par plante D_3 D_4 D_6 : 20 talles/10 plantes 1 à 2 épis par plante
4-05-1971	Floraison : Témoin D_1 D_2 : 22 épis/10 plantes (début) D_3 D_4 D_6 : 20 épis/10 plantes
25-05-1971	Fin floraison : Témoin D_1 D_2 : 24 épis/10 plantes D_3 D_4 D_6 : 20 épis/10 plantes
18-06-1971	Maturité : Témoin D_1 D_2 : 25-26 tiges/10 plantes — 23-24 épis — 80 à 90 cm de hauteur — 42 à 44 g MS des parties aériennes — 35 à 42 g MF des semences — Poids de 1 000 semences : 45 g D_3 D_4 D_6 : 22 tiges/10 plantes — 20 épis — 80 à 90 cm de hauteur — 35 à 38 g MS des parties aériennes — 32 à 35 g MF des semences — Poids de 1 000 semences : 45 g

2. — *Coupe et récolte des essais*

Dans les expériences de compétition de la première année, les critères retenus au moment de la coupe de l'essai pour comparer la croissance et le développement du blé en l'absence et en présence des trois densités de véronique ont été les suivants :

a) le nombre de talles de blé ;

b) la hauteur moyenne d'une talle de blé ;

c) la matière sèche totale des parties aériennes de blé ;

d) la matière sèche moyenne par plante des parties aériennes de véronique à feuilles de lierre.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 3 et 4.

Dans l'expérience de compétition de la seconde année, les critères suivants ont été retenus :

a) le nombre de tiges de blé et le nombre de tiges de blé épiées par vase de végétation ;

b) la hauteur et la matière sèche des tiges de blé épiées à la récolte par vase de végétation ;

c) la matière fraîche, à la récolte, des semences de blé par vase de végétation;

d) le poids de 1 000 semences de blé.

Ces résultats sont présentés dans le tableau 5.

IV. — DISCUSSION

1. — *Étude des effets densité × azote*

En première analyse, l'examen du tableau 3 permet de constater que l'effet densité se traduit par une chute assez régulière des valeurs des différents paramètres mesurés sur blé (nombre et hauteur des talles, matière sèche totale des parties aériennes) en fonction des densités croissantes de véronique.

TABLEAU 3

Étude des effets densité × azote

Mesures effectuées	Effet densité	Effet azoté					Analyses statistiques
		N_0	N_1	N_2	N_3	N_4	
Nombre de talles pour 9 plantes de blé	D_0	38,5	38,0	39,2	42,2	42,0	Azote : NS Densité : *HS* Interaction : NS CV = 15,6 %
	D_1	33,2	36,3	35,7	38,3	37,7	
	D_2	28,3	31,7	33,0	31,2	33,3	
	D_3	27,7	27,7	27,3	27,0	29,7	
Hauteur moyenne d'une talle de blé (en cm)	D_0	48,5	50,9	50,6	52,0	55,4	Azote : *S* Densité : *HS* Interaction : NS CV = 13,4 %
	D_1	39,8	45,9	46,7	46,7	48,9	
	D_2	37,2	39,1	41,1	38,3	44,4	
	D_3	33,3	34,4	32,6	35,6	35,9	
Matière sèche totale des parties aériennes de 9 plantes de blé (en g)	D_0	7,98	8,03	7,67	7,83	8,42	Azote : NS Densité : *HS* Interaction : NS C.V. = 10,1 %
	D_1	6,87	7,42	7,93	7,43	7,87	
	D_2	6,78	6,38	6,45	6,27	6,78	
	D_3	5,47	5,48	5,90	6,03	5,97	
Matière sèche moyenne des parties aériennes de 1 véronique (en g)	D_0	—	—	—	—	—	Azote : NS Densité : *HS* Interaction : NS CV = 18,4 %
	D_1	0,60	0,70	0,73	0,75	0,75	
	D_2	0,94	0,93	1,03	0,90	0,99	
	D_3	0,71	0,69	0,76	0,73	0,72	

L'analyse statistique plus précise de cet essai permet de mesurer l'effet densité, l'effet azote et l'interaction.

L'effet azote n'est pas significatif au seuil de 5 p. 100, sauf pour la hauteur moyenne d'une talle, mais le test de Newmann et Keuls (test de comparaison multiple de moyennes, DAGNELIE, 1969) ne permet pas de considérer comme significativement différentes les valeurs obtenues pour la fumure azotée la plus basse et celles obtenues pour la fumure azotée la plus élevée.

L'effet densité, par contre, est très hautement significatif au seuil de 1 p. 1 000 pour tous les critères de comparaison retenus, et le test de Newmann et Keuls appliqué à chaque analyse a permis de mettre en évidence certaines différences significatives au seuil de 1 p. 100.

Pour le nombre de talles ainsi que pour la hauteur moyenne d'une talle, les écarts observés sont significatifs au seuil de 1 p. 100 entre l'absence de véronique (D_0) et la présence de 4 et 8 véroniques par vase (D_2 et D_3) et entre la présence de 2 véroniques (D_1) et la présence de 8 véroniques (D_3).

Pour la matière sèche totale des parties aériennes de blé, une différence significative apparaît entre l'absence de véronique et la présence de 2 véroniques (D_0 et D_1) d'une part, et la présence de 4 ou 8 véroniques (D_2 et D_3) d'autre part.

Dans nos conditions expérimentales, le seuil de sensibilité du blé à la présence de véronique semble se situer à 4 véroniques par vase.

Les pesées de matières sèches des parties aériennes de véronique montrent que l'optimum de croissance de cette espèce se situe à 4 véroniques par vase (D_2) et qu'en deçà (D_1) ou au-delà (D_3), la croissance des véroniques en présence de blé est significativement plus faible. Il faut toutefois signaler que le coefficient de variation de cet essai est relativement élevé et surtout que la croissance des véroniques dans les vases où seulement 2 véroniques étaient présentes s'est montrée très irrégulière, ce qui suggère la nécessité d'utiliser des vases de végétation assez grands pour permettre l'implantation, aux faibles densités, d'un nombre suffisant d'individus, afin de pallier l'hétérogénéité génétique de la véronique et des mauvaises herbes en général.

Enfin l'interaction densité × azote n'est significative en aucun cas ; on peut expliquer cela par la présence d'une fumure de fond trop élevée et une fumure complémentaire relativement trop faible qui masquent à la fois l'effet azote et l'interaction.

Cette première expérience ne démontre pas la nocivité de la présence de véroniques lorsque la population adventice est inférieure à 57 plantes au m^2 ; un effet significatif sur la croissance du blé est visible lorsque cette densité atteint et dépasse 115 plantes au m^2, dans les conditions de notre expérimentation.

2. — *Étude des effets densité × humidité*

L'examen du tableau 4 montre, en première analyse, que l'effet densité se traduit à nouveau par une chute régulière des valeurs des différents paramètres mesurés en fonction des densités croissantes de véroniques, d'une part, et que le régime d'humidité constante (H_0) est plus favorable à la croissance du blé que les régimes de sécheresse (H_1 et H_2) d'autre part.

L'analyse de variance montre précisément un effet densité toujours hautement significatif, un effet humidité presque toujours hautement significatif aussi et une

interaction significative pour l'un des paramètres mesurés (le nombre de talles).

Pour le nombre de talles, les écarts sont significatifs au seuil de 1 p. 100 entre l'absence de véroniques (D_0) et la présence de 4 ou 8 véroniques par vase (D_2 et D_3) et entre la présence de 2 véroniques (D_1) et la présence de 8 véroniques (D_3), confir-

TABLEAU 4

Étude des effets densité × humidité

Mesures effectuées	Effet humidité	Effet humidité			Analyses statistiques
		H_0	H_1	H_2	
Nombre de talles pour 9 plantes de blé	D_0	55,5	54,0	57,1	Humidité : *S* Densité : *HS* Interaction : *HS* CV = 11,0 %
	D_1	53,5	51,7	47,3	
	D_2	50,0	40,7	49,2	
	D_3	46,3	43,0	36,0	
Hauteur moyenne d'une talle de blé (en cm)	D_0	67,9	60,9	58,7	Humidité : *HS* Densité : *HS* Interaction : NS CV = 9,4 %
	D_1	64,6	53,3	51,8	
	D_2	54,8	45,4	48,0	
	D_3	47,4	44,1	38,0	
Matière sèche totale des parties aériennes de 9 plantes de blé (en g)	D_0	7,50	6,63	6,60	Humidité : *HS* Densité : *HS* Interaction : NS CV = 10,0 %
	D_1	6,53	5,97	5,53	
	D_2	6,30	5,17	5,12	
	D_3	5,58	4,80	4,38	
Matière sèche moyenne des parties aériennes de 1 véronique (en g)	D_0	—	—	—	Humidité : *HS* Densité : *HS* Interaction : NS CV = 19,4 %
	D_1	1,02	0,79	0,61	
	D_2	0,88	0,72	0,65	
	D_3	0,74	0,53	0,49	

mant ainsi les résultats de l'expérience précédente. L'effet humidité est significatif au seuil de 2,5 p. 100, mais le test de comparaison des moyennes ne permet pas de mettre en évidence de différences significatives ; toutefois, l'examen des données du tableau 4 permet de suggérer qu'une humidité constante (H_0) favorise le tallage. L'interaction densité × humidité est significative au seuil de 1 p. 100 et le test de Newmann et Keuls montre qu'en présence de 4 véroniques par vase (D_2), le tallage du blé en régime de sécheresse constante (H_1) est significativement inférieur au tallage du blé en régime d'humidité plus ou moins accusé (H_0 et H_2), alors qu'en

présence de 8 véroniques par vase (D_3), le tallage du blé en régime mixte (humidité puis sécheresse, H_2) est significativement inférieur aux régimes, soit d'humidité constante (H_0), soit de sécheresse constante (H_1) : ceci montre qu'à forte densité de véroniques, une période de sécheresse constante fait moins de tort au blé qu'une courte période de sécheresse appliquée seulement pendant le tallage.

Pour la hauteur moyenne d'une talle, les conclusions sont identiques : la hauteur des talles diminue régulièrement lorsque la densité de véroniques augmente (différence significative entre deux moyennes consécutives) et le régime d'humidité constante (H_0) permet une croissance du blé significativement supérieure aux régimes de sécheresse (H_1 et H_2).

TABLEAU 5

Étude de l'effet densité

Mesures effectuées	Effet densité					
	D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
Nombre de talles pour 12 plantes de blé	31,3	29,5	29,5	27,5	28,0	28,5
	Effet significatif à 2,5 % CV = 6,1 %					
Nombre de talles épiées pour 12 plantes de blé	28,7	27,7	27,3	25,3	24,8	24,8
	Effet significatif à 1 % CV = 7,4 %					
Hauteurs cumulées des talles épiées de 12 plantes de blé (en m)	24,9	24,1	23,2	21,5	21,3	20,9
	Effet significatif à 1 % CV = 8,8 %					
Matière sèche totale (épis non compris) des parties aériennes de 12 plantes de blé (en g)	42,3	41,7	39,5	38,0	38,7	36,5
	Effet significatif à 5 % CV = 8,4 %					
Matière fraîche des semences produites par 12 plantes de blé (en g)	40,3	40,2	38,5	34,8	37,7	35,0
	Effet non significatif à 10 % CV = 10,6 %					
Poids de 1 000 graines (en g)	44,5	45,4	44,9	45,2	46,7	46,3
	Effet non significatif à 10 % CV = 6,2 %					

La matière sèche totale des parties aériennes de blé décroît lorsque la densité de véroniques augmente puisque des différences significatives apparaissent entre absence de véronique (D_0) et présence de véronique (D_1, D_2, D_3), et entre 2 véroniques (D_1) et 8 véroniques par vase (D_3). La production de matière sèche enfin est significativement plus élevée en régime d'humidité (H_0) qu'en régime de sécheresse (H_1 et H_2).

Les pesées de matière sèche des parties aériennes de véronique montrent qu'à densité élevée (D_3), la croissance de cette espèce est significativement plus faible qu'à densité plus faible (D_2 et D_1) ; comme pour le blé, le régime d'humidité constante (H_0) permet une croissance significativement plus grande de la véronique que les régimes de sécheresse (H_1 et H_2) et les différences de croissance entre les régimes H_1 et H_2 s'atténuent lorsque la densité de véroniques augmente.

3. — *Étude de l'effet densité sur le rendement*

Cette expérience a permis de préciser l'influence de densités variables de véroniques sur le rendement d'un blé d'hiver.

L'examen du tableau 5, que confirme l'analyse statistique, montre l'effet dépressif des véroniques sur la croissance du blé.

Le nombre de talles et plus encore, le nombre de talles épiées, décroît de façon significative lorsque la densité atteint 9 véroniques par vase (D_3) ; les hauteurs cumulées des talles épiées ne présentent pas de différences significatives entre les 3 premières densités de véroniques (D_0, D_1 et D_2) d'une part et entre les 3 dernières densités (D_3, D_4 et D_5) d'autre part, mais il existe une différence significative entre D_0 et chacune des densités du deuxième ensemble ; ainsi à partir de 9 véroniques par vase, le blé subit une nette réduction de croissance et de tallage.

La matière sèche totale des parties aériennes de blé (épis non compris) est moins affectée par la présence de véronique puisque l'effet densité n'est significatif qu'à 5 p. 100 ; le test de Newmann et Keuls montre qu'il n'y a aucune différence significative entre deux densités consécutives bien qu'à partir de 9 véroniques par vase (D_3), la croissance du blé soit significativement plus faible qu'en l'absence de véroniques (D_0).

Bien que la moyenne (de 6 répétitions) des poids frais des semences produites par vase ait tendance à décroître en fonction de la densité de véroniques (tabl. 5), aucun effet significatif au seuil de 10 p. 100 n'a été mis en évidence ; l'analyse a été faite sur des semences fraîchement récoltées, mais les mesures d'humidité des caryopses ont montré que celle-ci était relativement constante entre traitements (variation de 13 à 15 p. 100 d'humidité).

Bien que l'analyse de variance ne démontre aucune différence significative entre les densités de véroniques sur le poids de 1 000 caryopses, on peut noter une tendance pour le blé à produire des grains plus lourds en présence de véronique. Ces derniers résultats sont à rapprocher des précédents : il est possible que la réduction du tallage en présence de fortes densités de véroniques soit compensée par une augmentation du poids spécifique des semences au fur et à mesure que la véronique, au cycle biologique court, disparaît.

V. — CONCLUSION

Les deux séries d'expériences précédentes ont montré surtout l'effet dépressif de la densité de *Veronica hederaefolia* L. sur le nombre de talles et sur le nombre d'épis du blé d'hiver *Prieur*. La densité critique a été comparable dans les deux cas,

115 à 200 plantes au m². Elle est 2 à 4 fois supérieure aux densités de véroniques rencontrées dans la nature, mais quelle part revient, dans la compétition vis-à-vis du blé, aux autres mauvaises herbes qui lui sont ordinairement associées, *Stellaria media* L. ou *Capsella bursa pastoris* L. MEDIK, notamment ?

De faibles apports de fumure azotée en cours d'expérience alors qu'existait une fumure de fond relativement déjà forte n'ont pas modifié beaucoup la compétition entre véronique et blé. En présence de fortes densités de véroniques, le tallage du blé souffre moins d'un régime hydrique réduit et constant que d'une période de sécheresse en cours de tallage, succédant à un régime hydrique normal. C'est également ce qu'observe KOCHER (1968) sur le tallage de l'avoine en compétition avec *Sinapis arvensis* L. et du blé en compétition avec *Alopecurus myosuroïdes* HUDS.

Veronica hederaefolia L. exerce sa compétition au moment du tallage, ce qui se manifeste par une réduction du nombre de talles épiées ; il semble que le blé puisse ensuite compenser cette réduction de tallage puisque les rendements en grains ne diminuent pas de façon significative en fonction des densités croissantes de véroniques ; toutefois, la variabilité statistique de cette dernière analyse laisse subsister un doute que seule une expérimentation de plein champ pourrait lever.

D'autre part, l'arrière-effet d'adventices à germination tardive, de port végétatif, comparable à celui de *Veronica hederaefolia* L., comme par exemple *Linaria spuria* L., pourrait donner lieu à d'intéressantes observations sur l'influence d'une compétition continue subie par le blé d'hiver.

Reçu pour publication en mai 1973.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements à MM. DALEBROUX de la Station d'Amélioration des Plantes, de GOURNAY du Laboratoire de Malherbologie et LIBOIS de la Station d'Agronomie de l'I. N. R. A. à Dijon qui nous ont conseillés au cours de la réalisation de ces essais ainsi qu'à MM. BURTE et FONTAINE pour leur aide technique.

SUMMARY

STUDY IN THE GREENHOUSE OF THE COMPETITION BETWEEN WINTER WHEAT AND AN EARLY WEED (*VERONICA HEDERAEFOLIA* L.)

Ivy-leaved speedwell (*Veronica hederaefolia* L.) is frequently found in cultivated winter wheat where its ecological, biological and physiological characteristics enable it to be a significant weed.

The competition between this weed and the winter wheat variety *Prieur* was carried out over a two-year period in plant containers.

In the first series of tests, the effects of two environmental factors, nitrogen and moisture content of the soil, on the competition between the two species were investigated ; for a given density of wheat the density of speedwell was varied. Tests were continued until the tillering of wheat. For each factor studied, the statistical analysis of the tests showed the following results :

— considerable reduction in the number and the height wheat shoots when the density of speedwell reaches 115 plants per square metre ;

— the nitrogenous fertilizer used had no effect on wheat tillering ;
— reduction of shoots when moisture content is scarce but the result observed depends on both the density of speedwell and the duration of drought.

In the second series of tests, competition between these species was studied until harvesting of the wheat. About the same critical speedwell density was found as before, beyond which tillering starts decreasing. After tillering, however the cereal appears to recover, since grain yield is not significantly reduced by the presence of speedwell up to the density studied, i. e. 400 plants per square metre.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNG DER KONKURRENZ IM TREIBHAUS ZWISCHEN DEM WINTERZEIZEN UND EINEM FRUHZEITIGEN UNKRAUT *VERONICA HEDERAEFOLIA* L.

Der efeublättrige Ehrenpreis (*Veronica hederaefolia* L.) tritt in Winterweizenkulturen auf, wo er wegen seiner ökologischen, biologischen und physiologischen Merkmale ein wichtiges Unkraut ist.

Die Untersuchung des Konkurrenz zwischen jenem Unkraut und der Winterweizensorte Prieur wurde zwei Jahre hindurch als Versuche in Vegetations gefässen durchgeführt.

Bei der ersten Versuchsreihe untersuchte man die Auswirkung zweier Milieufaktoren, nämlich des Stickstoffs und der Bodenfeuchtigkeit, auf die Konkurrenz zwischen den beiden Pflanzen mit verschiedenen Dichten des Ehrenpreises bei gleichbleibender Weizendichte. Diese Untersuchungen wurden bis zur Bestockung des Weizens durchgeführt. Bei jedem untersuchten Faktor lieferte die statistische Analyse des Versuchs die folgenden Ergebnisse :

— eine bedeutende Verminderung der Anzahl der Weizenhalme und ihrer Höhe, wenn die Unkrautdichte 115 Pflanzen pro Quadratmeter erreicht ;
— keine Auswirkung des verwendeten Stickstoffdüngers auf die Bestockung des Getreides ;
— eine Verminderung der Bestockung, wenn die Feuchtigkeit unzureichend ist, aber die beobachtete Auswirkung hängt sowohl von der Ehrenpreisdichte als von der Trockenheitszeitlänge ab.

Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Untersuchung der Konkurrenz zwischen den gleichen Gattungen bis zur Weizenernte weitergeführt. Die Bestockung wurde abermals von ungefähr derselben Unkrautdichte wie vorher vermindert ; anscheinend kann doch der Wei zen nach der Bestockung seine Verspätung aufholen, da der Kornertrag durch die Anwesenheit des Ehrenpreises bei der untersuchten Dichte, d. h. 400 Pflanzen pro Quadratmeter, nicht bedeutend zurückging.

РЕЗЮМЕ

Ж. П. КОССАНЕЛЬ, Д. КЛЕР, Г. БАРРАЛИС.

Изучение соревнования между озимой пшеницей и раннеспелым сорняком. (*Veronica hederaefolia* L.)

Вероника плющелистая (*Veronica hederaefolia* L.) часто встречается в культурах озимой пшеницы, где ее экологические, биологические и физиологические характерности превращают ее в очень важное сорное растение этой культуры.

Соревнование наблюдающееся между этим сорняком и сортом озимой пшеницы « Приер » изучалось в течении двух лет в опытах проведенных в вегетационных сосудах. В первой серии этих опытов изучалось действие двух факторов среды, азота и влажности почвы, на сорев-

нование между двумя этими растениями при изменяющейся густоте растений вероники и неизменной плотности посева пшеницы. Опыты длились до периода кущения пшеницы.

Для каждого из изученных факторов, статистический анализ позволил выявить следующие результаты :

— количество побегов пшеницы и их высота сильно уменьшаются в случаях когда густота растений вероники в культуре достигает 115 на кв. метр;

— примененное азотное удобрение не имело никакого влияния на силу кущения пшеницы;

— при недостаточной влажности почвы сила кущения пшеницы уменьшалась, но отмеченный эффект зависел и от густоты растений вероники в культуре, и от времени поддержания засухи;

Во второй серии опытов изучение соревнования между теми-же растениями и в тех-же условиях продолжалось до жатвы. И. если критическая густота растений сорняка в культуре оказалось и здесь приблизительно одинаковой с критической густотой первой серии опытов, оказалось что пшеница после кущения постепенно наверстывает свое опоздание, ибо присутствие вероники с густотой в 400 растений на кв. метр в культуре не уменьшило достоверным образом урожай зерна пшеницы.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALESSI J., POWER J. F., 1970. Influence of row spacing, irrigation and weeds on dryland flax yield, quality and water use. *Agron. J.*, **62** (5), 635-37.

BARRALIS G., 1965. Aspects écologiques des mauvaises herbes dans les cultures annuelles. *3e Conférence du Columa*, Paris.

BARRALIS G., 1969. Observations sur l'évolution de la flore adventice. I. Influence de quatre années de désherbage sur un assolement normal. *3e Colloque sur la Biologie des Mauvaises Herbes*, Grignon.

BURGEVIN H., 1938. Le rôle de l'expérimentation physiologique dans l'expérimentation agricole. *Ann. agron.*, **8**, 447-467.

CHANCELLOR R. J., 1964. The depth of weed seed germination in the field. *Proc. 7th Brit. Weed Cont. Conf.*, 607-613.

CHANDRA-SAXENA M., 1965. Einfluss der Wasserversorgung auf das Wachstum und die Mineralstoff Aufnahme einiger Getreidearten. *Diss. Hohenheim Institut für Pflanzenschutz*, Stuttgart R. F. A.

COÏC Y., LESAINT Ch., PIOLLAT M.-Th., 1962. Influence de la déficience en potassium et de la déficience en eau sur la composition minérale de l'orge. *Ann. Physiol. Vég.*, **4**, 227-234.

COÏC Y., LESAINT Ch., PROVOT M., 1964. Comportement et composition minérale des organes à la récolte de deux blés durs et d'un blé tendre ; influence de la nutrition azotée tardive et de la sécheresse. *Ann. Physiol. vég.*, **6**, 83-90.

DAGNELIE P., 1969. *Théorie et méthodes statistiques*, tome 2, p. 245. Duculot Éd.

DEMOLON A., 1956. *Principes d'Agronomie*. T. II. *Croissance des végétaux cultivés*. Dunod Éd. Paris.

GRANSTRÖM B., 1957. Studien über die Konkurrenz zwischen Kulturpflanzen und Unkraütern. *Verh. Intern. Pflanzenschutz kong*, **1**, 60.

HAMMERTON J. L., 1967. Effects of weed control and nitrogen application rate on the yield and nitrogen content of kale. *Weed Res.*, **7** (1), 37-50.

HARRIS G. A., WILSON A.-M., 1970. Competition for moisture among seedlings of annual and perennial grasses as influenced by root elongation at low temperature. *Ecology*, **51** (3), 530-4.

KOCH W., 1967. Untersuchungen zur Konkurrenzwirkung von Kulturpflanzen und Unkraütern aufeinander. II. Schadwirkung von Samenunkraütern auf Getreide. *Weed Res.*, **7**, 22-28.

KÖCHER H., 1967-1968. *Untersuchungen zur Konkurrenz zwischen annuellen Unkraütern und Getreide unter besonderer Berücksichtigung des WasserundNährstoffaktors*. Diplom. Hausarbeit.

KURTH H., LINKE E., 1969. Studies on the competition of several weed species under increased fertilization. *Nachrbl. dt. Pfl. Schutzdienst Berl.* (10), 203-7.

LIBOIS A., 1970. Action de la nutrition minérale sur la production du ray-grass anglais et de la fétuque des prés en culture mixte. *Ve Colloque d'Écologie*, Paris.

RADEMACHER B., 1963. Effect of the severe frost of the winter 1961-62 on the stand of the previous years surviving weeds and their control in winter sown crops. *5 Dtsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie u- bekampfung*, p. 9, Hohenheim.

SNOY M. L., 1952. *Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf das Gedeihen von Ackernunkraütern in Reinkultur und in natürlichen Gemeinschaften.* Diss. Hohenheim Institut für Pflanzenschutz, Stuttgart.

STANIFORTH D. W., 1958. Soybean foxtail competition under varying soil moisture conditions. *Agron. J.*, **50**, 13-15.

THURSTON J. M., 1959. A comparative study of the growth of wild oats (*Avena fatua* L. and *Avena ludoviciana* DUR.) and of cultivated cereals with varied nitrogen supply. *Ann. appl. Biol.*, **47** (4), 716-739.

VAN RIPER G. E., 1964. Influence of soil moisture on the herbage of two legumes and three grasses as related to dry-matter yield, crude protein and botanical composition. *Agron. J.*, **56** (1), 45-50.

VENGRIS J., COLBY W. G., DRAKE M., 1955. Plant nutrient competition between weeds and corn. *Agron. J.*, **47**, 213-216.

WEIGERT J., WEITZEL H., 1937-1938. Wachstumsverlauf und Sticksoffaufnahme bei Winterweizen und efeublättrigen Ehrenpreis (*Veronica hederaefolia*). *Prakt. Blätter Pflanzenbau und schutz* XV, **819**, 233-247.

WELBANK P. J., 1961. A study of the nitrogen and water factors in competition with *Agropyron repens*. *Ann. Bot.* London, **25**, 116-37.

WIESE A. F., VANDIVER C. W., 1970. Soil moisture effects of competitive ability of weeds. *Weed Sci.* **18** (4), 518-519.

Ann. agron., 1973, **24** (6), 707-731.

NOUVELLE MÉTHODE D'ÉTUDE DE L'ENRACINEMENT DES VÉGÉTAUX PÉRENNES A PARTIR D'UNE TRANCHÉE SPIRALE

J. G. HUGUET
avec la collaboration technique de J. GIRAUDON

Station d'agronomie,
Centre de Recherches de Bordeaux, I. N. R. A.,
33140 Pont de la Maye

RÉSUMÉ

Une méthode d'étude de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée en forme de spirale logarithmique a été mise au point. Des exemples d'application concernant l'enracinement du Prunier d'Ente sont donnés. Les informations recueillies sur le terrain (nombre, position et dimension des sections de racines sur les deux faces de la tranchée) sont transformées en indices permettant de caractériser le système racinaire : indice de répartition centrifuge, indice de multiplication racinaire, répartition en profondeur, indice de résistance morphologique au déracinement. Ces données sont chiffrées et il est possible de les comparer statistiquement.

SIGNIFICATION DES LETTRES EMPLOYÉES

α : paramètre de définition d'une spirale ;
β : distance entre le tronc et le point de départ de la spirale interne ;
δ_i : diamètre d'une racine ;
d : diamètre du tronc de l'arbre étudié ;
D : distance maximale d'exploration racinaire ;
h : distance d'un point de la spirale à la ligne de plantation ;
j : numéro d'ordre d'une classe élémentaire d'exploitation ;
k : numéro d'ordre d'une sous-classe de profondeur ;
o : origine du système de référence en coordonnées polaires ;
p : profondeur d'une racine ou d'une sous-classe ;
R : rayon moyen de la couronne de l'arbre étudié ;

ρ : longueur du rayon vecteur d'un point de la spirale (système de coordonnées polaires) ;
σ : pour un point de la spirale, longueur d'arc parcouru depuis l'origine ;
θ : pour un point de la spirale, angle de définition en coordonnées polaires ;
V : indice de résistance morphologique au déracinement.

INTRODUCTION

Les végétaux supérieurs sont des êtres vivants fixés à un substrat dont ils tirent les éléments minéraux nécessaires à leur alimentation. Anatomiquement, ce sont les racines qui assurent ces deux fonctions essentielles : la fixation et l'absorption. L'efficacité des racines dans ces deux fonctions dépend en partie des caractères de leur répartition dans le sol. L'ensemble de ces racines est organisé en un système ramifié : le système racinaire, dont la connaissance objective serait un moyen de rendre plus efficaces les interventions sur le milieu : façons culturales, apports d'éléments nutritifs, irrigation.

En général, le système racinaire des plantes pérennes est mal connu ; en effet, les techniques d'observation employées jusqu'à maintenant fournissent des résultats difficilement exploitables, le plus souvent qualitatifs. De plus, il n'est pas possible d'étudier l'enracinement ailleurs qu'en pleine terre, car le développement des racines en milieu artificiel sur substrat solide ou liquide est beaucoup trop différent de ce qui se passe dans un sol en place pour permettre des comparaisons utiles.

Nous intéressant à l'écologie des arbres fruitiers, nous avons été amenés à rechercher une méthode nouvelle d'étude des racines.

I. — BASES THÉORIQUES DE LA MÉTHODE

Nous avons cherché à mettre au point une méthode d'étude du système racinaire répondant aux critères suivants :

1° l'arbre étudié ne doit pas être détruit, et les dégâts de prospection doivent être les plus faibles possibles ;

2° les renseignements obtenus doivent être quantitatifs et permettre une définition de l'enracinement en fonction de la distance du tronc.

Pour résoudre ce problème, nous avons assimilé le système racinaire à un système rayonnant à partir du tronc, d'extension limitée à la distance maximum d'exploitation racinaire D. Le système racinaire est donc compris tout entier sous une aire circulaire de rayon D. Avec un sol et des conditions de culture homogènes, les racines se répartissent assez régulièrement autour du tronc, mais il peut arriver qu'un facteur détruise cette homogénéité : effet de pente obligeant à ne travailler que dans un seul sens, irrigation par rampe capillaire fixe, etc. La symétrie de révolution du système racinaire est alors détruite, et il apparaît dans le cas le plus général une symétrie par rapport au rang de plantation.

Puisqu'il y a au moins une symétrie par rapport à la ligne de plantation, il suffira d'explorer la zone inscrite dans le demi-cercle de rayon D. Cette exploration débutera à une distance minimum β du tronc ; en effet, pour la survie de l'arbre, il n'est pas possible de partir du tronc même.

Les méthodes traditionnelles d'exploration : dissection totale, tranchées rectilignes (tangentielles ou radiales), tranchées circulaires, ne répondant pas aux exigences que nous nous sommes fixées, il faut définir une figure simple permettant d'explorer cette zone, en coupant le maximum de racines et en s'éloignant régulièrement du tronc de β à D.

Il y a au moins trois figures géométriques simples qui répondent à ces objectifs (fig. 1) :

a) un demi-cercle de rayon $\simeq \frac{D + \beta}{2}$

b) une spirale d'Archimède, dont la formule en coordonnées polaires est :

$$\rho = \alpha\theta + \beta$$

c) une spirale logarithimique, dont la formule en coordonnées polaires est :

$$\rho = \beta e^{\alpha\theta}$$

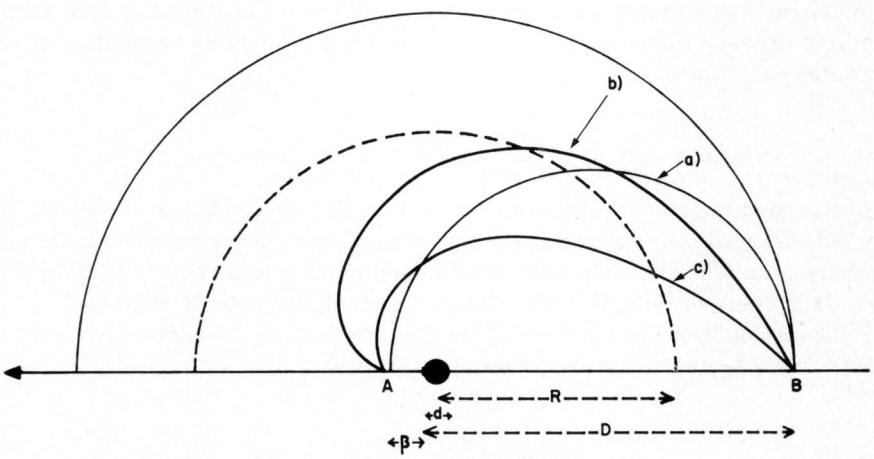


FIG. 1. — *Figures d'exploration racinaire*

a : demi-cercle de rayon $\simeq D + \beta$ — R : rayon de la couronne
b : spirale d'archimède — *d* : diamètre du tronc
c : spirale logarithmique — D : rayon maximum de prospection

De ces trois courbes, nous devons choisir celle dont l'arc est le plus court entre le point A, origine de la courbe, et le point B, point limite d'exploration. De plus, si on assimile les racines à des rayons, il importe pour des raisons d'homogénéité de détection que la courbe retenue coupe les rayons d'une façon comparable tout au long de la prospection. Or, le calcul prouve que, pour θ variant de O à π, c'est l'arc de spirale logarithmique qui est le plus court ; d'autre part, cette courbe a la propriété d'avoir en tout point un angle constant avec son rayon vecteur.

C'est donc une tranchée en forme de spirale logarithmique qui permettra avec

le minimum de terrassement de couper les racines à des distances du tronc régulièrement variables dans des conditions parfaitement comparables tout au long de l'arc étudié, puisque cet arc de spirale fera en tout point un angle constant avec la direction générale de croissance des racines.

L'exploitation de la tranchée ainsi définie se fera par un relevé topographique des sections de racines (nombre, position) rencontrées sur les deux faces de la tranchée. En effet, seul le relevé sur les deux faces permet :

— d'une part, d'avoir une répétition à la même distance du tronc (face interne et face externe) de données statiques (nombre de racines, dimensions, profondeur) ;

— d'autre part, cette double exploration permet une appréciation dynamique du comportement des racines par la comparaison des relevés de deux faces opposées comprises dans le même secteur angulaire.

II. — UTILISATION PRATIQUE DE LA MÉTHODE

Dans l'application de cette méthode, nous avons cherché à simplifier et à normaliser rigoureusement toutes les opérations, dans le but de faciliter le relevé proprement dit et de standardiser l'exploitation des résultats (afin qu'ils puissent, au besoin, être traités par ordinateur).

1. — *Définition de la spirale en fonction des dimensions de l'arbre*

L'extension racinaire maximum dépend à la fois des conditions de sol, de l'âge et des dimensions de l'arbre étudié. Il fallait donc décider d'une formule qui tiendrait compte, pour la définition de la spirale d'étude, du diamètre du tronc (d) et du rayon moyen de la couronne (R), le point origine (O) étant situé contre le tronc.

Dans les conditions de notre étude sur Prunier, nous avons adopté les conditions suivantes pour définir la spirale de base (spirale interne) :

$$\theta = \pi,\ \rho = 1{,}5\ R$$
$$\beta = 1{,}5\ d$$

A partir de la formule, en coordonnées polaires, de la spirale logarithmique,

$$\rho = \beta e^{\alpha\theta}$$

on tire

$$\boxed{\alpha = \frac{\operatorname{Log} \frac{R}{d}}{\pi}}$$

Nous avons réalisé à notre usage une abaque (tabl. 1) donnant α en fonction de R et de d et ρ en fonction de θ $(0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{4}, \pi)$.

TABLEAU I

Abaque pour le tracé de la spirale de base

R : rayon moyen de la couronne. *d* : diamètre du tronc

d(cm)	R(cm)									
	50	75	100	125	150	175	200	250	275	300
	8-13	8-15	8-16							
5	24-42	29-57	34-71							
	75-133	113-221	150-317							
7,5	0,732 9	0,862 0	0,953 6							
		15-25	15-27	15-28	15-30	15-31	15-32	15-34	15-34	
10		41-68	47-84	53-100	58-114	63-128	67-142	75-168	79-180	
		113-186	150-267	188-353	225-443	263-537	300-634	375-839	413-945	
12,5		0,641 4	0,732 9	0,804 0	0,862 0	0,911 1	0,953 6	1,024 6	1,054 9	
			23-36	23-38	23-40	23-42	23-43	23-45	23-47	
15			58-93	65-110	71-127	77-142	82-156	92-186	96-199	
			150-241	188-319	225-400	263-485	300-573	375-757	413-853	
17,5			0,603 9	0,674 9	0,732 9	0,782 0	0,824 5	0,895 5	0,925 9	
				30-47	30-50	30-52	30-53	30-56	30-58	30-59
20				75-119	82-136	89-153	95-169	106-199	111-214	116-229
				188-296	225-372	263-451	300-533	375-705	413-794	450-885
22,5				0,583 3	0,641 4	0,690 4	0,732 9	0,804 0	0,834 3	0,862 0
					38-59	38-61	38-63	38-67	38-68	38-70
25					92-144	99-161	106-178	119-211	124-227	130-242
					225-352	263-427	300-505	375-667	413-751	450-838
27,5					0,570 3	0,619 4	0,661 9	0,732 9	0,763 3	0,791 0
						45-70	45-72	45-76	45-78	45-80
30						109-169	116-187	130-221	136-237	142-253
						263-408	300-482	375-637	413-718	450-800
32,5						0,561 4	0,603 9	0,674 9	0,705 2	0,732 9
							53-81	53-86	53-88	53-90
35							125-194	140-229	147-246	154-263
							300-464	375-613	413-691	450-770
37,5							0,554 8	0,625 8	0,656 2	0,683 9

Légende : $\rho_0, \rho\frac{\pi}{4}, \rho\frac{\pi}{2}, \rho\frac{3\pi}{4}, \rho\pi, \rho\frac{5\pi}{4}, \alpha$

2. — *Réalisation de la tranchée*

Sur le terrain, il suffit de mesurer R et d qui permettent, à partir de l'abaque, de déterminer le tracé de la spirale. On choisit alors le point origine O contre le tronc. O sera sur la ligne de plantation s'il y a un risque d'hétérogénéité provoquant une symétrie par rapport au rang, sinon O sera choisi en un point quelconque autour du tronc. Sur le rayon passant par O, on porte ρ_0 qui donne le point A, départ de l'arc de spirale (OA = β). On prolonge alors OA de 60 cm pour avoir le point de départ de la spirale externe. On trace ensuite OM de façon à ce que l'angle $\widehat{AOM} = \frac{\pi}{4}$ et l'on porte OM = $\rho \frac{\pi}{4}$, que l'on augmente de 60 cm pour avoir le point correspondant de la spirale externe. On procède ainsi de $\frac{\pi}{4}$ en $\frac{\pi}{4}$ jusqu'à $\theta = \pi$. Tous les points construits sont matérialisés par des piquets qui serviront de base aux tracés, avec du cordeau, des spirales externe et interne. Les dimensions de la tranchée obtenue assurent des conditions d'observation relativement confortables pour un observateur moyen.

En théorie, la tranchée devrait descendre aussi profondément que l'on trouve des racines mais, étant donné la profondeur que peuvent atteindre les racines de certaines plantes pérennes (jusqu'à plus de 5 à 6 m pour la Vigne), il faut en pratique s'arrêter lorsque le nombre de racines rencontrées devient négligeable par rapport aux fréquences observées dans les horizons supérieurs. Pour les rosacées fruitières de nos climats, la profondeur de 80 cm correspond à une profondeur maximum d'étude et, en général, une profondeur de 60 cm est pratiquement suffisante pour observer le système racinaire dans la presque totalité de son extension verticale.

A titre d'exemple : pour un prunier de 10 ans (d = 20 cm, R = 250 cm), nous obtenons une tranchée dont l'arc moyen (spirale située à mi-chemin entre les spirales interne et externe) a 640 cm sur une largeur réelle de 50 cm ; avec 60 cm de profondeur, on obtient une excavation approchant 2 m³. Pour $\theta = \pi$, le rayon vecteur de la spirale externe est de 420 cm. Si l'on avait voulu pratiquer une dissection totale du système racinaire sur 420 cm de rayon et pour la même profondeur, il aurait fallu remuer 33 m³ de terre.

Nous constatons que la tranchée spirale n'a concerné que 6 p. 100 du volume de sol qu'une dissection complète aurait bouleversé. L'économie de main-d'œuvre est donc évidente, et l'on comprend que l'arbre puisse survivre à cette opération, qui finalement n'atteint qu'une faible partie de son système souterrain.

Afin de limiter encore les dégâts occasionnés à l'arbre, il est important, dans la réalisation de la tranchée, de commencer à creuser à l'aplomb de la couronne, en prenant la précaution, lorsqu'on s'approche du tronc, de respecter les grosses racines.

3. — *Technique d'observation*

La technique de relevé proprement dite est parfaitement classique et consiste à noter le nombre et la position des racines par référence au système de coordonnées d'un filet souple à mailles carrées. La détection des racines se fait maille par maille, en rafraîchissant la coupe afin de dégager le plus possible de racines.

Nous avons constaté qu'il suffisait de faire deux types d'observations par maille élémentaire de prospection :

a) relever exactement le diamètre et la position de chacune des racines de diamètre supérieur ou égal au millimètre ;

b) noter le chiffre correspondant au nombre de racines de diamètre inférieur au millimètre.

Il est bien entendu que ces observations doivent être obligatoirement complétées par un examen aussi détaillé que possible du profil cultural, avec toutes les notations et prises d'échantillons propres à ce genre d'étude. En effet, il est indispensable de relier un type d'enracinement aux caractéristiques pédologiques et culturales de la parcelle.

III. — EXPLOITATION DES OBSERVATIONS ET RÉSULTATS

L'efficacité d'une méthode d'étude du système racinaire sera fonction de sa sensibilité et de sa fidélité.

De sa sensibilité va dépendre la détection statistique des modifications d'enracinement liées à l'éloignement du tronc et aux différentes conditions de sols et de culture.

La fidélité permettra de trouver des résultats statistiquement comparables pour des arbres génétiquement identiques, de même âge, et placés dans les mêmes conditions culturales.

Dans le but de tester ces deux qualités indispensables à une étude objective de l'enracinement, nous avons réalisé des comparaisons sur deux séries de relevés.

Première série : 3 pruniers d'Ente (P 707 sur porte-greffe clonal P 8.1) âgés de 10 ans (d = 20 cm ; R = 250 cm), installés sur des alluvions récentes de la basse vallée du Lot de texture argilo-limoneuse (argile : 30,4 p. 100 ; limons 2-50 μ : 33,8 p. 100 ; sables fins : 17 p. 100 ; sables grossiers : 18,8 p. 100). Ces trois profils correspondent aux numéros 4, 5 et 6.

Deuxième série : 3 pruniers d'Ente (P 707 sur porte-greffe Myrobolan clonal), âgés de 6 ans (d = 10 cm ; R = 200 cm), installés sur sol sableux (argile : 3 p. 100 ; limons 2-50 μ : 11,8 p. 100 ; sables fins : 21,4 p. 100 ; sables grossiers : 62,6 p. 100). Ces trois profils correspondent aux numéros 7, 8 et 9.

Nous décrirons chacune des méthodes de calcul susceptibles de mettre en évidence une caractéristique de l'enracinement et, dans chaque cas, les conclusions tirées de la comparaison des six profils.

1. — *Distribution centrifuge des racines*

Dans cette première partie, nous ne tiendrons compte ni de la profondeur ni de la dimension des racines ; nous essaierons seulement de définir la distribution des traces de la projection de ces racines sur un plan parallèle au sol. Cette distribution sera étudiée en fonction de la distance du tronc. Si l'on ne tient pas compte

de la dimension des racines, cette distribution serait parfaitement définie en connaissant toutes les intersections de la projection des racines avec des cercles concentriques ayant le tronc pour centre et des rayons régulièrement croissants. Si sur chacun de ces cercles, la répartition des intersections était régulière, il suffirait de connaître le nombre d'intersections sur un arc de ce cercle pour en déduire la répartition complète à cette distance du tronc.

Notre hypothèse de travail est de considérer que le nombre de sections de racines rencontrées sur la tranchée sous un arc de spirale, à condition que cet arc ne soit pas trop long, peut être assimilé au nombre d'intersections de la projection des racines de ce secteur avec le cercle dont le rayon est égal au rayon vecteur ρj du point au centre de cet arc de spirale (fig. 2). Le nombre absolu d'intersections sera considéré comme un indice représentatif de la distribution des racines de l'arbre à la distance ρj du tronc.

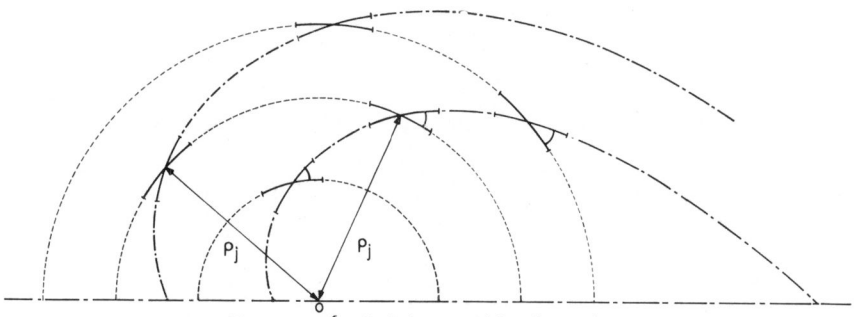


FIG. 2. — *Étude de la répartition des racines*

La signification de cet indice de distribution va dépendre de la longueur de l'arc choisi comme référence. Cet arc devrait être suffisamment petit pour que notre hypothèse de travail reste valable, mais suffisamment grand pour que, reporté en différents points du cercle de rayon ρj, le nombre d'intersections reste constant.

Si la répartition est homogène, la longueur de l'arc devrait au moins être égale à la distance séparant l'intersection de deux racines voisines sur le cercle de rayon ρj ; dans le cas contraire, cet arc devra être d'autant plus long que l'hétérogénéité de répartition est plus marquée.

Pour l'exploitation des résultats, il convenait en premier lieu de choisir la longueur de cet arc élémentaire en fonction de la longueur totale de l'arc de la spirale d'étude (de $\theta = O$ à $\theta = \pi$) et de la longueur de la maille de prospection. En effet, pour des raisons évidentes de simplification, il importe que cet arc contienne un nombre entier de mailles de prospection. Le choix de la longueur de l'arc élémentaire de spirale et de la profondeur pratique d'exploration définit les dimensions d'une classe élémentaire d'exploitation (fig. 3).

Nous avons défini la longueur de ces arcs élémentaires de façon à obtenir 12 classes élémentaires d'exploitation sur la spirale interne. La maille de prospection ayant 11 × 11 cm, les dimensions des classes élémentaires d'exploitation dans les deux situations sont alors les suivantes :

sol argilo-limoneux.....	44 cm d'arc, 55 cm de profondeur
sol sableux.....	33 cm d'arc, 55 cm de profondeur

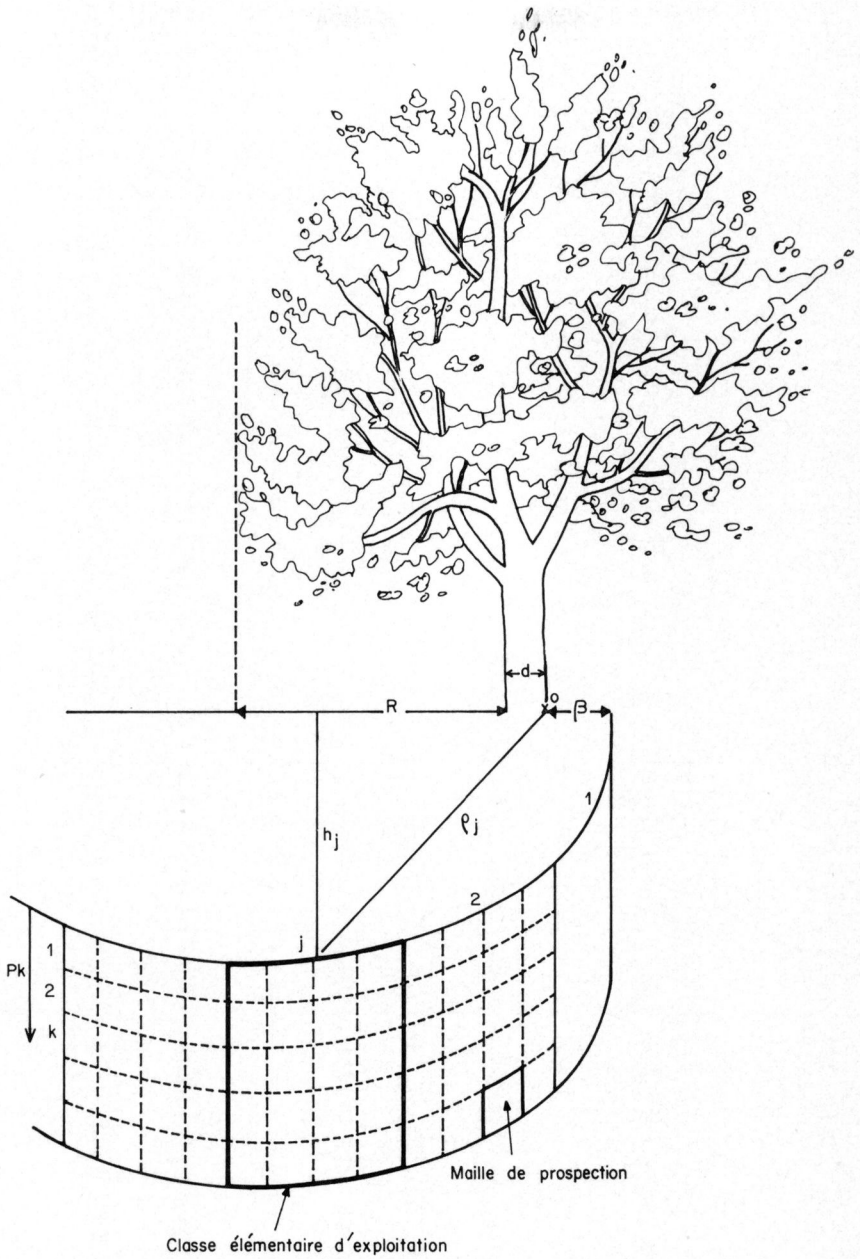


FIG. 3. — *Schéma de prospection et d'exploitation*

TABLEAU 2

Décompte des sections de racines par classe élémentaire d'exploitation

Profil nº 4, sol limono-argileux
(Face interne)

Nº de la classe (j)	Nombre de sections suivant la profondeur			Nombre total de sections pour la classe	Distance du tronc (ρ_j) en cm
	0-11 cm	11-33 cm	33-55 cm		
(a)	7	9	5	21	
1 (b)	31	43	24	98	45
(c)	38	52	29	119	
	1	4	2	7	
2	27	34	16	77	70
	28	38	18	84	
	0	5	2	7	
3	9	23	16	48	96
	9	28	18	55	
	0	7	0	7	
4	22	29	11	62	126
	22	36	11	69	
	1	3	2	6	
5	0	17	13	30	154
	1	20	15	36	
	0	2	0	2	
6	10	21	12	43	178
	10	23	12	45	
	0	1	6	7	
7	7	20	6	33	204
	7	21	12	40	
	0	2	1	3	
8	1	18	9	27	228
	1	20	10	30	
	0	1	3	4	
9	5	28	12	45	254
	5	29	15	49	
	0	0	1	1	
10	0	12	18	40	280
	0	12	19	41	
	0	5	4	9	
11	0	17	40	57	312
	0	22	44	66	
	0	0	2	2	
12	0	10	13	23	342
	0	10	15	25	

a : racines $\geqslant 1$ mm ; b : racines < 1 mm ; c : total.

TABLEAU 3

Décompte des sections de racines par classe élémentaire d'exploitation
Profil nº 4, sol limono-argileux
(Face externe)

Nº de la classe (j)	Nombre de sections suivant la profondeur			Nombre total de sections pour la classe	Distance du tronc (ρ_j) en cm
	0-11 cm	11-33 cm	33-55 cm		
(a)	3	4	4	11	
1 (b)	3	20	26	49	98
(c)	6	24	30	60	
	0	0	4	4	
2	2	20	20	42	110
	2	20	24	46	
	0	1	1	2	
3	2	5	10	17	126
	2	6	11	19	
	0	8	0	8	
4	1	16	6	23	142
	1	24	6	31	
	2	7	3	12	
5	1	17	22	40	164
	3	24	25	52	
	1	8	0	9	
6	3	16	6	25	186
	4	24	6	34	
	4	4	2	10	
7	5	13	14	32	206
	9	17	16	42	
	2	3	2	7	
8	3	15	6	24	226
	5	18	8	31	
	0	0	1	1	
9	2	17	8	27	248
	2	17	9	28	
	0	3	1	4	
10	0	5	20	25	268
	0	8	21	29	
	0	2	5	7	
11	0	12	15	27	286
	0	14	20	34	
	0	2	5	7	
12	0	9	15	24	310
	0	11	20	31	
	0	2	3	5	
13	0	3	19	22	336
	0	5	22	27	
	0	0	2	2	
14	0	9	15	24	362
	0	9	17	26	
	0	1	1	2	
15	0	12	16	28	390
	0	13	17	30	

a : racines $\geqslant 1$ mm ; b : racines < 1 mm ; c : total.

Il s'ensuit que ces classes élémentaires n'ont pas la même surface dans les deux situations.

a) *Calcul du nombre de sections par classe élémentaire.*

Il suffit de faire le décompte du nombre total de sections de racines par classe élémentaire d'ordre *j*. Chaque classe sera caractérisée par sa distance au tronc ρj et, le cas échéant, par la distance *hj* de la ligne de plantation (la distribution des racines en fonction de *hj* serait utile pour déceler les hétérogénéités de symétrie par rapport au rang de plantation).

L'avantage de travailler sur une tranchée géométriquement bien définie apparaît dans la détermination de ρj et de *hj*, qu'il ne sera pas nécessaire de relever sur le terrain puisqu'on pourra les obtenir sur un graphique ou même par le calcul. En effet, à partir de la formule de la spirale logarithmique $\rho = \beta e^{\alpha\theta}$ et pour un angle θ donné, on peut calculer la longueur σ de l'arc de spirale depuis l'origine en fonction de ρ et réciproquement à partir de la formule suivante : $\sigma = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2}}{\alpha} (\rho\text{-}\beta)$.

Pour une même tranchée, le décompte par classe doit naturellement se faire sur les deux faces, la dimension de la classe élémentaire de prospection restant la même quelle que soit la face étudiée.

A titre d'exemple, les résultats de ces dénombrements pour un profil (n° 4, sol argilo-limineux) apparaissent dans les tableaux 2 et 3.

b) *Calcul de l'indice de distribution centrifuge.*

Il importe à ce moment de profiter de l'avantage des répétitions à même distance du tronc. En effet, on trouve (fig. 2) sur la face externe, des classes de même distance par rapport au tronc que les classes de la face interne. Si l'on fait la moyenne des nombres de sections relevées dans ces classes homologues, la valeur obtenue peut être considérée comme l'indice moyen de distribution centrifuge propre à cette classe. L'ensemble de ces indices formera un bilan de la distribution des racines en fonction de l'éloignement du tronc, et sera caractéristique du profil étudié.

Le calcul de l'indice de distribution apparaît dans le tableau 4 et on peut le traduire par un graphique (fig. 4).

L'utilisation des classes homologues pour réaliser ce bilan n'est possible que lorsqu'il n'existe aucune cause culturale ou topographique susceptible de modifier l'homogénéité de la distribution racinaire.

c) *Résultats et discussion.*

Le tableau 5 fournit le bilan des six profils étudiés. Comme les classes élémentaires d'exploitation n'avaient pas la même surface, nous avons été amenés à exprimer l'indice de distribution, non plus sous la forme du nombre total de sections rencontrées par classe, mais sous la forme du nombre moyen de sections par décimètre carré, ce qui représente une densité par dm^2.

La comparaison des deux séries de profils se heurte à une autre difficulté : les arbres des deux lots n'ayant pas la même dimension moyenne, les spirales n'ont pas la même formule et, d'un lot à l'autre, des classes de même numéro d'ordre ont des

TABLEAU 4

Calcul de l'indice de distribution centrifuge
Profil nº 4, sol limono-argileux

Décomptes face interne			Décomptes face externe			Moyenne	
nº	ρ int.	*n* int.	nº	ρ ext.	*n* ext.	ρ_j	Indice moyen
1	45	119				45	119
2	70	84				70	84
3	96	55	1	98	60	97	57
4	126	69	3	126	19	126	44
5	154	36	5	164	52	159	44
6	178	45	6	186	34	182	39
7	204	40	7	206	42	205	41
8	228	30	8	226	31	227	30
9	254	49	9	248	28	257	33
10	280	41	11	286	34	283	32
11	312	66	12	310	31	311	48
12	342	25	13	336	27	339	26
			14	362	26	362	26
			15	390	30	390	30

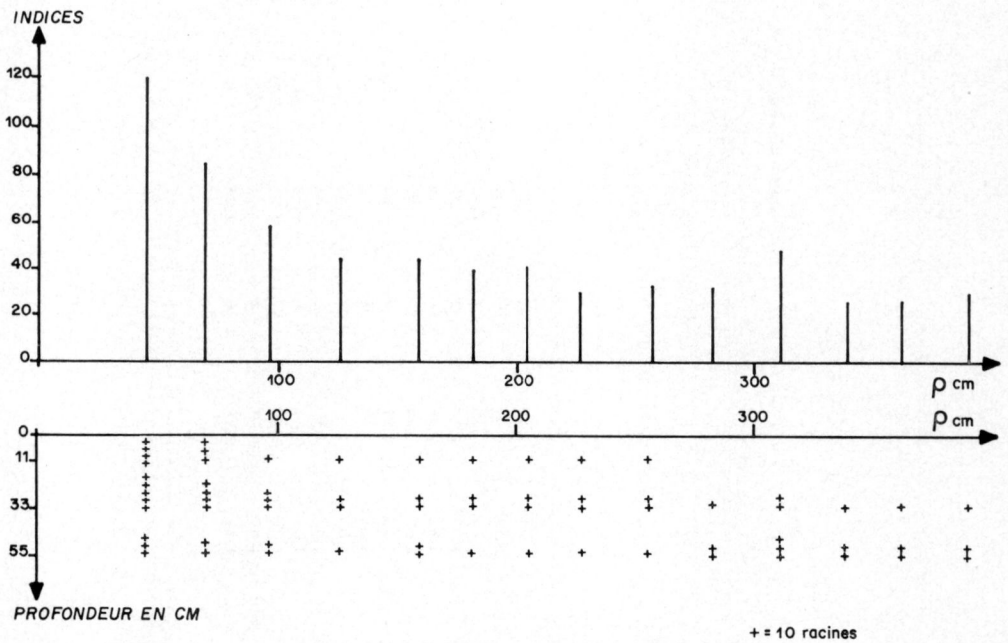


FIG. 4. — *Indices de répartition centrifuge*
Sol argilo-limoneux (BOURRAN nº 4)

TABLEAU 5

Densités des racines en fonction de la distance du tronc

N° profil (j)	Sol argilo-limoneux						Sol sableux					
	Densités de racines dm²			Densité moyenne	Distance du tronc		Distance du tronc		Densité moyenne	Densités de racines dm²		
	4	5	6		ρj cm	ρ_{cj}	ρ_{cj}	ρj cm		7	8	9
1	4,91	4,42	3,31	4,21	45	0,180	0,130	26	4,22	5,45	2,31	4,90
2	3,47	5,53	3,93	4,31	70	0,280	0,250	50	4,63	4,35	5,12	4,41
3	2,36	3,10	2,98	2,81	97	0,388	0,370	74	3,86	3,36	3,47	4,74
4	1,82	2,23	1,61	1,89	126	0,504	0,480	96	3,67	2,87	4,46	3,69
5	1,82	2,85	1,90	2,19	159	0,636	0,605	121	3,49	3,69	3,42	3,36
6	1,61	2,36	1,61	1,86	182	0,728	0,695	139	2,79	2,53	2,59	3,25
7	1,69	2,11	2,02	1,94	205	0,820	0,840	168	3,45	2,81	4,08	3,47
8	1,24	1,49	2,98	1,90	227	0,908	0,945	189	3,78	5,01	3,64	2,70
9	1,36	1,49	2,06	1,64	257	1,028	1,045	209	3,63	4,57	4,02	2,31
10	1,32	2,40	0,91	1,54	283	1,132	1,155	231	2,79	2,98	3,20	2,20
11	1,98	1,61	1,69	1,76	311	1,244	1,250	250	2,48	2,75	3,37	1,32
12	1,07	1,94	1,57	1,53	339	1,356	1,400	280	1,65	1,92	0,33	2,70
13	1,07	0,83	1,78	1,23	362	1,448	1,520	304	1,49	2,37	0,44	1,65
14	1,24	0,58	1,86	1,23	390	1,560	1,620	324	0,99	1,76	0,11	1,10

distances absolues au tronc qui ne sont pas les mêmes. Ainsi, pour la classe n° 7 :

$\rho 7 = 205$ cm dans la parcelle argilo-limoneuse ;

$\rho' 7 = 168$ cm dans la parcelle sableuse.

Cette difficulté n'existe évidemment pas si l'on veut comparer des arbres de mêmes dimensions, ce qui ne se réalise pratiquement que dans le cas des arbres d'une même parcelle. Or l'intérêt d'une étude objective de l'enracinement est justement de comparer le comportement, en conditions différentes, d'arbres qui n'auront que très exceptionnellement les mêmes dimensions.

Mais finalement, l'extension absolue du système racinaire est moins intéressante que la notion d'extension relative de ce système par rapport à une dimension mesurable de l'arbre en question. Il importe plus de connaître cette extension par rapport au rayon moyen de la couronne que d'avoir cette dimension exacte en unité conventionnelle de longueur. Pratiquement, nous adoptons le rayon moyen R de la couronne de l'arbre étudié (ou du groupe d'arbres) comme unité de longueur pour mesurer l'extension du système racinaire. Dans le tableau 5, les deux colonnes centrales donnent les distances ρ_{cj} et ρ'_{cj} avec ces nouvelles unités de longueur.

Si l'on examine ces nouvelles distances, on constate que, grâce aux propriétés géométriques de la spirale logarithmique et aux dimensions respectives des mailles d'exploitation, les chiffres obtenus sont très voisins pour les classes de même ordre dans les deux séries de profils. Ceci nous permet donc de comparer les densités de racines d'une série de profils à l'autre par classes homologues de distance relative.

Avant d'étudier globalement l'essai constitué par l'ensemble des six profils sur les deux types de sol, nous avons étudié chaque série de profils séparément, comme un essai à trois blocs (arbres) et à 14 traitements (14 classes de distance par rapport au tronc). Le tableau 6 donne les résultats des deux analyses de variance

TABLEAU 6

Analyse de variance sur les densités de racines en fonction de la distance du tronc par type de sol séparé

Effets	Sol argilo-limoneux		Sol sableux		F théorique	
	Degré de liberté	F calculé	Degré de liberté	F calculé	5 %	1 %
Blocs : arbres	2	1,84	2	0,78	3,37	5,53
Traitements : distance tronc	13	8,29**	13	4,03**	2,15	2,96
Erreur	26		26			

(il est bon de préciser que nous avions d'abord vérifié que la distribution des résidus statistiques pour les trois séries de valeurs dans les deux types de sol était bien normale).

Nous constatons que, dans chaque type de sol, l'effet bloc n'est pas significatif,

tandis que l'effet distance du tronc est hautement significatif dans les deux cas. Ceci permet de vérifier la fidélité de cette méthode d'exploration, puisque l'hétérogénéité individuelle n'est pas significative, tandis que sa précision est suffisante pour faire apparaître d'une façon très significative l'effet éloignement du tronc.

Cette double série d'essais peut également s'interpréter globalement comme un essai factoriel à deux facteurs : éloignement du tronc (14 niveaux), type de sol (2 niveaux) et 3 répétitions. Le tableau 7 donne l'analyse de variance correspondant à cet essai.

TABLEAU 7

Analyse de variance sur les densités de racines dans l'essai factoriel sol-distance du tronc

Effets	Degrés de liberté	F calculé	F théoriques	
			5 %	1 %
Sol	1	28,99**	4,08	7,31
Distance	13	9,09**	1,93	2,53
Interaction	13	1,33	1,93	2,53
Résiduel	56			

L'effet sol est très hautement significatif, ce qui implique que, globalement, les densités de racines sont très différentes dans les deux types de sols. La figure 5, donnant les densités moyennes des racines dans les deux types de sols, montre bien cet effet traduisant une densité de racines systématiquement plus élevée dans la parcelle sableuse.

L'effet distance est aussi hautement significatif. Nous retrouvons ici l'effet déjà observé par analyse de variances séparées. Dans les deux types de sol, l'éloignement du tronc se traduit par des modifications significatives des densités de racines, ce qui est tout-à-fait logique. L'examen de la figure 5 montre que la densité des racines semble ne pas évoluer de la même façon suivant la distance du tronc dans les deux types de sols. En sol argilo-limoneux, après un maximum proche du tronc, il y a diminution des densités jusqu'à 0,5 R, puis décroissance lente jusqu'à plus de 1,5 R (R = rayon de la couronne).

En sol sableux, il apparaît deux maximum : l'un à 0,25 R et l'autre à R ; à partir de ce deuxième maximum, la décroissance est rapide. L'analyse de variance nous permet de tester, dans cet essai, cette interaction apparente entre l'effet distance et la nature du sol. En réalité, bien que cette interaction ne soit pas significative au seuil de 5 p. 100, il semble exister une tendance notable à un double maximum en sol sableux (effet que nous avons pu retrouver dans un autre cas).

Dans cette étude sur la répartition centrifuge du système racinaire, nous avons fait le décompte de toutes les racines sans tenir compte de leur dimension. En effet, le nombre des « grosses » racines ($\geqslant$ 1 mm) est toujours faible (tabl. 2 et 3) et l'hétérogénéité de leur répartiton rend sans signification leur décompte isolé pour la description de la distribution des racines.

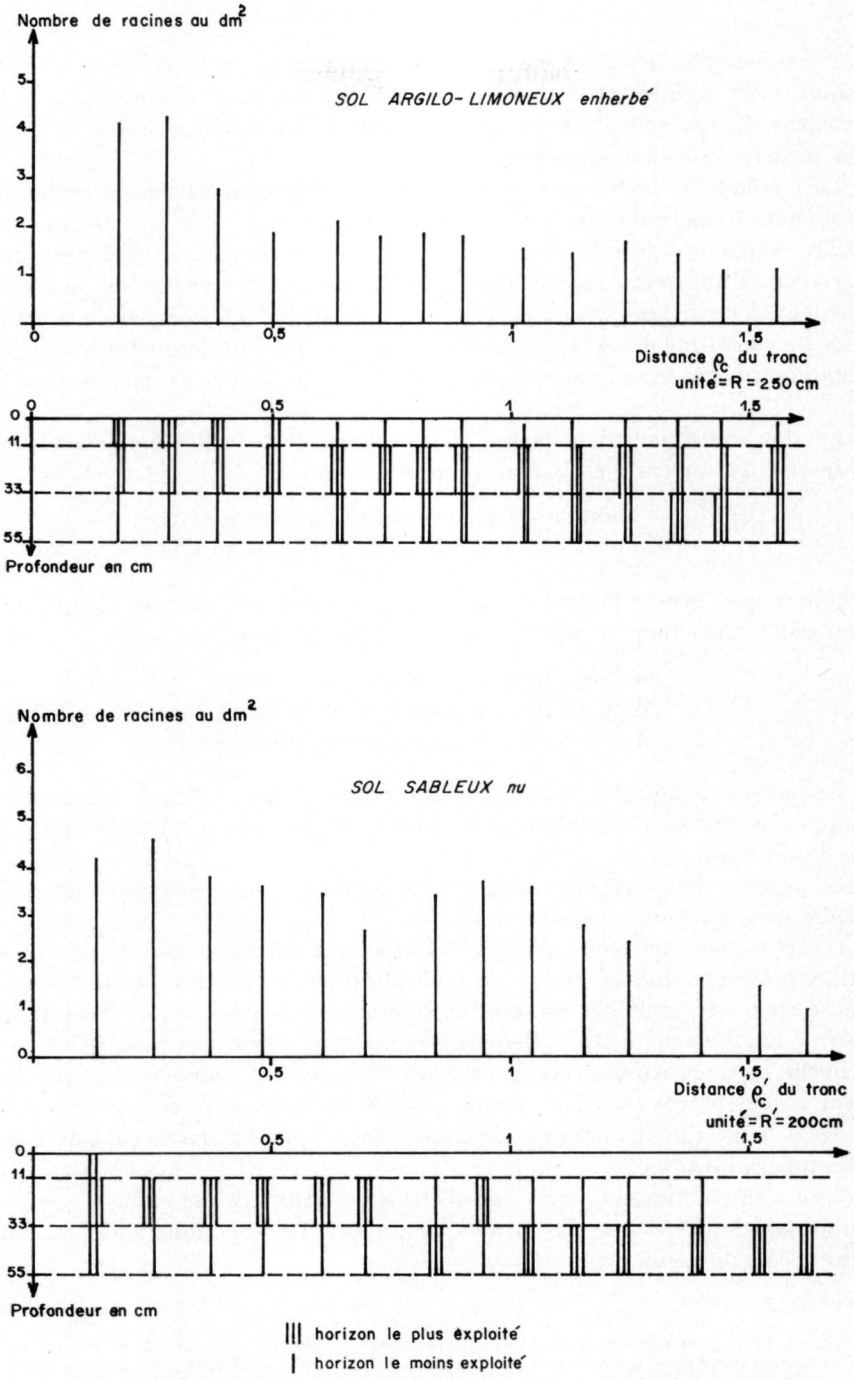


FIG. 5. — *Fréquence des racines en fonction de la distance du tronc et de la profondeur*

2. — *Indice de multiplication racinaire*

Si les densités racinaires varient systématiquement en fonction de la distance du tronc, c'est qu'il existe des zones de multiplication ou de régression du nombre des racines. La détermination de l'emplacement de ces zones complète la définition de la répartition centrifuge des racines.

La méthode de la tranchée spirale permet cette appréciation de l'intensité de la prolifération des racines par secteur. En effet, il suffit de comparer dans une même tranchée le nombre de racines observées sur les faces opposées comprises dans le même secteur angulaire. La détermination de ces secteurs angulaires se fera arbitrairement, à partir du graphique correspondant aux caractéristiques de la tranchée, de façon à construire des secteurs angulaires de 30 à 45° dans lesquels les arcs inscrits des spirales interne et externe comprennent un nombre entier de mailles de prospection.

Le dénombrement des racines sur les faces de tranchée correspondant aux arcs inscrits permettra d'établir un rapport :

$$M = \frac{\text{nombre de racines dans le secteur externe}}{\text{nombre de racines dans le secteur interne}}.$$

Ce rapport peut être considéré comme un indice global d'intensité de la multiplication des racines dans le volume de terre correspondant.

$M < 1$: zone de régression racinaire ;
$M \simeq 1$: zone de stabilisation racinaire ;
$M > 1$: zone de multiplication racinaire.

Le tableau 8 donne les valeurs de ces indices de multiplication racinaire pour les six profils étudiés, et l'analyse de variance correspondant à l'interprétation factorielle de cet essai.

La figure 6 donne en plan la signification des indices moyens de multiplication racinaire dans les deux types de sols étudiés.

L'effet secteur qui correspond à l'éloignement du tronc est hautement significatif, c'est-à-dire que cet indice de multiplication est fonction de la distance du tronc. L'effet sol s'approche du seuil de signification à 5 p. 100, c'est-à-dire que la valeur de l'indice tend à être différente selon le type de sol. On remarque que, dans la parcelle argilo-limoneuse, cet indice n'est franchement supérieur à 1 que dans le secteur le plus proche du tronc, tandis qu'en sol sableux, il reste supérieur à 1 pour tous les secteurs situés à l'intérieur de la couronne et qu'il est très élevé dans le secteur le plus proche du tronc.

L'effet interaction n'est pas loin d'être significatif, ce qui prouve que l'indice de multiplication tend à ne pas évoluer de la même façon en fonction de la distance du tronc dans les deux types de sols.

Nota : Il faut noter que l'on peut aussi comparer statistiquement deux profils isolés par un calcul de la corrélation entre les densités observées par classes homologues de distance. Le coefficient de corrélation sera d'autant plus proche de 1 que les distributions seront comparables. Si les arbres sont de même dimension, on peut également faire un test X^2 sur les nombres absolus des sections de racines par classe élémentaire.

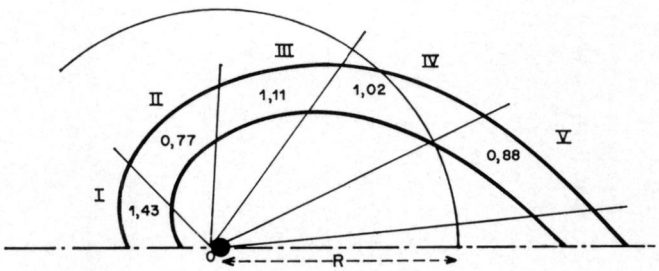
TABLEAU 8

Indice de multiplication racinaire

N°	Sol limono-argileux			Indice moyen	N°	Sol sableux			Indice moyen
	4	5	6			7	8	9	
I	0,89	1,18	2,22	1,43	I	2	2,50	2,30	2,27
II	0,73	0,85	0,74	0,77	II	1,45	1,44	1,23	1,37
III	0,86	1	1,46	1,11	III	1,52	1,81	0,98	1,44
IV	0,95	1,40	0,71	1,02	IV	0,77	0,65	0,53	0,67
V	0,69	0,71	1,20	0,88	V	0,90	0,19	0,86	0,65

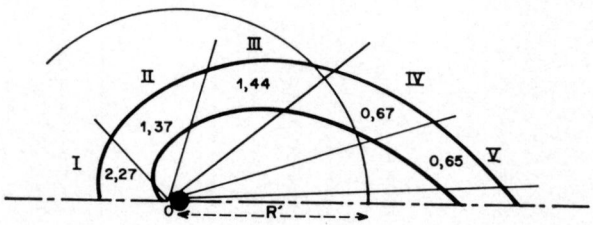
Effets	Degrés de liberté	F calculé	F théoriques	
			5 %	1 %
Secteurs	4	9,26**	3,48	5,99
Sol	1	3,54	4,96	10,04
Interaction.....	4	3,22	3,48	5,99
Résiduel	10			

SOL ARGILO- LIMONEUX



R= Rayon de la couronne

SOL SABLEUX



R' = Rayon de la couronne

FIG. 6. — *Indices moyens de multiplication racinaire*

TABLEAU 9

Répartition en profondeur du système racinaire
Bilan pour le profil nº 4 en sol argilo-limoneux

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Nº classe élémentaire
38-52-29 (*a*) (*b*) (*c*)	28-38-18	9-28-18	22-36-11	1-20-15	10-23-12	7-21-12	1-20-10	5-29-15	0-12-19	0-22-44	0-10-15	face interne

Nº classe élémentaire	1	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15
face externe	6-24-30	2-6-11	3-24-25	4-24-6	9-17-16	5-18-8	2-17-9	0-14-20	0-11-20	0-5-22	0-9-17	0-13-17
38-52-29	28-38-18	7-26-24	12-21-11	2-22-20	7-23-9	8-19-14	3-19-9	3-23-12	0-13-19	0-16-32	0-7-18	0-9-17	0-13-17

a = nombre de sections de racines pour la classe entre 0 et 11 cm de profondeur ;
b = — — — — 11 et 33 cm —
c = — — — — 33 et 55 cm — .

3. — *Répartition en profondeur*

Dans l'étude de l'enracinement d'un arbre, la façon dont les racines se répartissent dans l'épaisseur du profil est un caractère déterminant de l'efficacité du système racinaire pour l'alimentation de l'arbre. Lors du décompte par classe élémentaire de prospection (fig. 3) et dans les tableaux correspondants (tabl. 2 et 3), nous avons fait, dans chaque classe, des sous-totaux partiels correspondant à trois sous-classes de profondeur : 0-11 cm ; 11-33 cm ; 33-44 cm. Il est alors possible d'utiliser comme précédemment l'avantage des classes et sous-classes homologues pour faire un bilan moyen de l'exploitation en profondeur pour un profil (tabl. 9), et de traduire conventionnellement cette intensité d'exploitation suivant la profondeur et suivant l'éloignement du tronc (fig. 4).

Nous avons de même fait un bilan général de la répartition verticale par type de sol (fig. 5), en adoptant une convention graphique simplifiée puisque, dans chaque classe, les horizons sont simplement classés suivant l'intensité relative de leur exploitation par les racines.

Il faut noter à propos de cette répartition verticale que, dans la parcelle argilo-limoneuse, le sol était enherbé depuis un an, ce qui explique l'exploitation de l'horizon superficiel que l'on ne retrouve pas en sol sableux, dont la parcelle est régulièrement travaillée.

4. — *Indice de résistance morphologique au déracinement*

L'estimation de la stabilité d'implantation d'un arbre est indispensable pour connaître sa résistance à des accidents climatiques exceptionnels, mais aussi, afin de mieux utiliser les techniques de ramassage mécanique des fruits par secouage des arbres.

La connaissance de la répartition et de la dimension d'une partie des « grosses racines » (diamètre $\geqslant$ 1 mm) permet d'obtenir une image relative de la résistance morphologique d'un arbre au déracinement. Résistance morphologique, car la valeur obtenue dépendra uniquement de la dimension et de la position des racines de l'arbre étudié, indépendamment des propriétés du sol susceptibles d'intervenir sur sa cohésion.

La résistance d'un fragment isolé de racine à une traction verticale va dépendre du volume du parallélépipède de sol dont elle est la base, et de la cohésion de celui-ci. Or, ce volume est égal à la surface projetée du fragment multipliée par sa profondeur dans le sol.

Pour un arbre tout entier, sa résistance à l'arrachage dépend du volume et de la cohésion du sol pesant directement sur l'ensemble de ses racines. On peut avoir une image simplifiée de ce volume en ne considérant que les « grosses racines » dont le diamètre est supérieur ou égal à 1 mm.

Sur les faces de la tranchée, nous avons relevé pour chaque grosse racine son diamètre et sa position ; nous avons donc :

ρ_i : distance du tronc ;
p_i : profondeur de la racine ;
δ_i : diamètre de la racine.

Si l'on cherche un indice représentatif du volume ainsi défini, on peut se contenter d'estimer le volume de sol recouvrant les « grosses » racines à l'intérieur de l'arc de spirale interne. On peut alors considérer (fig. 7) que la somme des volumes élémentaires définis par $v_i = \delta_i \times p_i \times \rho_i$ donne une bonne représentation du volume recherché. En effet, si la racine rencontrée ne s'est pas divisée depuis le tronc, à la réduction de diamètre près, le volume v_i est représentatif de la tranche de sol reposant réellement sur cette racine. Si au contraire nous avons, par exemple, deux sections de racines provenant de la division d'une grosse racine, on peut considérer que $v'_i + v''_i$ (fig. 7) représente, d'une façon approchée, le volume de sol situé au-dessus de la grosse racine d'origine et au-dessus des deux racines qui en sont issues.

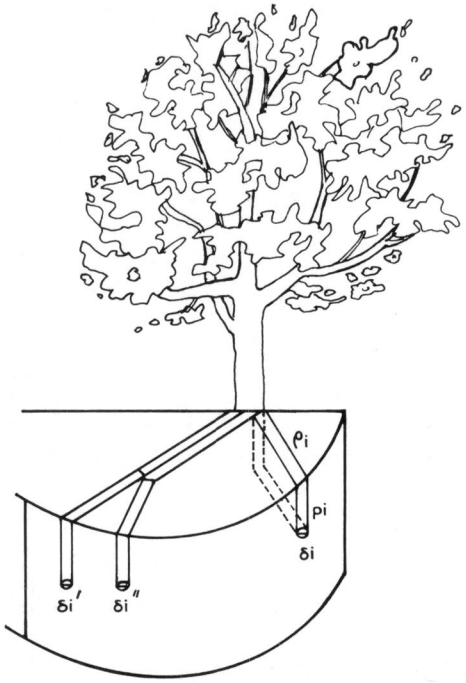


FIG. 7. — *Indice de résistance morphologique au déracinement*

Nous prenons donc comme indice de résistance morphologique au déracinement le volume $V = \Sigma\delta_i\rho_i p_i$, en calculant les volumes partiels pour toutes les racines supérieures ou égales au millimètre, dont les sections sont apparues sur la face interne de la spirale.

Calcul de V : pour simplifier les calculs, nous avons considéré que toutes les sections de racines situées dans une même classe d'exploitation étaient à la même distance du tronc p_j (fig. 2). De même, nous avons considéré que toutes les racines d'une même maille de prospection étaient à la même profondeur moyenne, égale à p_k : profondeur moyenne de cette maille de prospection. Le calcul se fera ensuite à partir d'une maille particulière ayant comme longueur sur la spirale celle de la classe élémentaire d'exploitation, et comme hauteur, celle de la maille de prospection. Une maille sera définie par j numéro d'ordre de sa classe, et par k numéro d'ordre de sa profondeur.

Le calcul de V se fera par une série de produits et de sommes :

Profondeur moyenne de la maille	Distances du tronc			Totaux partiels
	ρ_1	ρ_j	ρ_{12}	
P_1	$\rho_1 \sum_{1 \cdot 1} \delta_i$	$\rho_j \sum_{j \cdot 1} \delta_i$	$\rho_{12} \sum_{12 \cdot 1} \delta_i$	$P_1 \sum_{j=1}^{j=12} \rho_j \sum_{j \cdot 1} \delta_i$
P_k				$P_k \sum_{j=1}^{j=12} \rho_j \sum_{j \cdot k} \delta_i$
P_5				$P_5 \sum_{j=1}^{j=12} \rho_j \sum_{j \cdot 5} \delta_i$
				$V = \sum_{k=1}^{k=5} P_k \sum_{j=1}^{j=12} \rho_j \sum_{j \cdot k} \delta_i$

Le tableau 10 donne le résultat du calcul de V pour les six arbres étudiés.

Les résultats correspondant aux arbres d'origine différente se distinguent très significativement. Dans chaque parcelle, la dimension et la disposition des racines sont suffisamment homogènes pour que les volumes déterminés soient proches et que l'on puisse alors leur accorder une signification objective.

La conclusion tirée de ces résultats est que, par les seules différences morphologiques de leur système racinaire, les arbres de la parcelle argilo-limoneuse ont une résistance à l'arrachage presque trois fois plus élevée que celle des arbres de la parcelle sableuse — cela indépendamment des différences de cohésion des deux types de sols, qui vont encore accentuer la résistance absolue au déracinement de ces arbres.

TABLEAU 10

Indice morphologique de résistance au déracinement

Parcelle	Limono-argileuse (Bourran)			Sableuse (Ferrade)		
N° arbres	4	5	6	7	8	9
V (litres)	148	106	164	63	42	53
Écart type	29,9			10,5		
Moyenne	139,3			52,6		
Coefficient de variation	21,5 %			19,8 %		
Intervalle de confiance	84,3-194,3			33,4-71,9		

CONCLUSIONS

La méthode décrite permet d'obtenir un ensemble de données caractérisant le système racinaire d'un arbre. Cette définition est objective dans la mesure où les résultats obtenus sont chiffrés, et donc statistiquement éprouvables.

Les informations recueillies décrivent le système racinaire à partir de certains indices, dont on étudie les variations en fonction de la distance du tronc : indice de distribution centrifuge, indice de multiplication racinaire, répartition moyenne en profondeur, indice de résistance morphologique au déracinement.

La méthode donne, pour les mêmes arbres dans un même type de sol, des résultats statistiquement comparables, tandis qu'elle décèle des variations statistiquement significatives entre les enracinements d'arbres, qui diffèrent : soit par leur âge, soit par le type de sol qu'ils exploitent, ou même par la nature de leur porte-greffe. A ce propos, il est bon de signaler que cette étude ne prétend pas comparer l'enracinement du Prunier d'Ente en sol sableux et en sol limono-argileux. Ces deux cas ont été seulement choisis à titre d'exemple, comme support pratique à la description de notre méthode de prospection.

En résumé, cette méthode d'étude objective de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée spirale semble capable d'apporter une aide efficace à la connaissance de l'écologie des plantes pérennes. En effet, elle permet d'opérer sur le terrain, sans détruire l'arbre étudié, et elle fournit des informations précises dans un domaine qui échappait la plupart du temps à l'observation courante.

Reçu pour publication en mai 1973.

REMERCIEMENTS

Nous adressons tous nos remerciements à M. Max Rives, Directeur de la Station de Recherches de viticulture du Centre de Recherches de Bordeaux, pour ses conseils dans le traitement statistique des résultats.

SUMMARY

NEW METHOD OF STUDYING THE ROOTING OF PERENNIAL PLANTS BY MEANS OF A SPIRAL TRENCH

A method was found for studying the rooting of perennial plants by means of a logarithmic spiral shaped trench. Examples of application are given with regard to the French Prune tree. The information obtained during field work (number, position and size of the root sections on both sides of the trench) is converted into indices providing characteristics of the root system : centrifugal distribution index, root multiplication and depth distribution index, index of morphological resistance to uprooting. The data are numerical and can be statistically compared.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE NEUE UNTERSUCHUNGSMETHODE DER EINWURZELUNG PERENNIERENDER VEGETABILIEN VON EINEM SPIRALGRABEN AUS

Es wurde eine Untersuchungsmethode der Einwurzelung perennierender Vegetabilien von einem Graben in Form einer logarithmischen Spirale aus ausgearbeitet.

Es werden Anwendungsbeispiele betreffend den Pflaumenbaum von Ente angeführt. Die an Ort und Stelle erhaltenen Informationen (Zahl, Stellung und Dimensionen der Wurzelschnitte an beiden Seiten des Grabens) werden als Kennziffern für das Wurzelsystem ausgedrückt : Kennziffer der zentrifugalen Verteilung, Kennziffer der Wurzelvermehrung und Verteilung in die Tiefe, Kennziffer des morphologischen Entwurzelungswiderstands. Diese Daten werden zahlenmässig ausgedrückt und es ist möglich, statistische Vergleiche anzustellen.

РЕЗЮМЕ

Новый метод изучения укоренения многолетних растений при помощи спиральной траншеи.

Ж. ХЮГЕ.

Выработан новыйметод изучения укоренения многолетних растений при помощи траншей имеющих форму логарифмической спирали. Даются примеры применения этого метода при укоренении сливы для чернослива. Информация, собранная на местах (число, расположение и размеры отрезков корней на двух стенках траншей) перерабатывается в признаки способные охарактеризовать корневую систему : признак центробежного расположения, признак корневого размножения, признак расположения в глубину, признак морфологической устойчивости против вырывания. Данные эти оформляются в цифры и их можно статистически сравнивать.

Ann. agron., 1973, **24** (6), 733-738.

CHRONIQUE DES LIVRES

RANWELL (D. S.). — ECOLOGY OF SALT MARSHES AND SAND DUNES. — London, Chapman and Hall, 1972, 258 p.

Cet ouvrage compare les habitats des marais salés et des dunes sableuses ainsi que les processus écologiques que l'on y rencontre.

Il comprend quatre parties. La première est consacrée à des considérations générales sur les facteurs climatiques et hydrologiques et sur les problèmes de nutrition minérale.

La seconde et la troisième parties étudient en détail l'écologie de chacun des deux habitats, en termes analytiques. La dernière enfin traite des influences humaines dans l'aménagement des ressources des marais salés et des dunes sableuses.

Une importante bibliographie et un index-matières complètent l'ouvrage.

APPELQVIST (L. A.), OHLSON (R.), éd. — RAPESEED. CULTIVATION, COMPOSITION, PROCESSING AND UTILISATION. — Amsterdam, London, New-York, Elsevier Publish. Co, 1972, 391 p.

Ce livre vient combler une lacune et fait le point des connaissances actuelles sur tout ce qui concerne la culture, la composition, le traitement et l'utilisation du colza. Les différents chapitres sont les suivants :

— historique,
— production et commerce,
— botanique,
— culture,
— stockage,
— sélection en vue du rendement et de la qualité,
— composition chimique des graines de colza,
— analyse de l'huile de colza,
— fabrication des huiles et tourteaux de colza,
— traitement de l'huile de colza,
— utilisations non alimentaires de l'huile et des acides gras du colza,
— la lécithine du colza,
— valeur nutritive de l'huile de colza,
— valeur nutritive et usages du tourteau de colza.

Une importante bibliographie, comprenant essentiellement des travaux effectués au Canada et en Europe au cours de ces dernières années, complète l'ouvrage.

DUTHIL (J.). — ÉLÉMENTS D'ÉCOLOGIE ET D'AGRONOMIE. T. 2 et 3 : EXPLOITATION ET AMÉLIORATION DU MILIEU. T. 2 : BASES D'UNE NUTRITION EFFICACE DU VÉGÉTAL ; T. 3 : EMPLOI DES FACTEURS DE LA PRODUCTION VÉGÉTALE. — Paris, Baillière, 1973, 656 p.

Le premier tome de cet ouvrage traitait des thèmes suivants : la plante, le climat, le sol et l'eau dans le sol. Ces deux tomes qui terminent l'ouvrage traitent, dans le tome 2, du travail du sol, des amendements calcaires, des amendements humiques, de la nutrition végétale. Le tome 3 comporte les 4 titres suivants :

— l'eau, facteur de production,
— la fertilisation,
— intensité, équilibre, conséquence et contrôle de la fertilisation,
— potentialités, orientations, assolements et rotations.

La présentation est très didactique. Chaque thème est présenté à l'aide de figures, de dessins et de graphiques qui rendent les explications faciles à comprendre. Par ailleurs, de nombreuses données résultant d'expériences récentes constituent des références utilisables en pratique.

L'auteur fait très largement appel aux travaux français ou à des mises au point écrites dans notre langue. Le lecteur peut alors se reporter facilement aux travaux étrangers.

Cet ouvrage peut rendre de grands services aux étudiants avancés et aux chercheurs qui y trouveront clairement exposé l'état des travaux récents.

S. HÉNIN

CENTRO INTERNAZIONALE PER LA COOPERAZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE AGRARIA (C. I. C. R. A.). SIMPOSIO AGRONOMICO (GLI ECOSISTEMI DELLA ZONA MEDITERRANEA) IN OCCASIONE DEL CENTENARIO DELLA FONDAZIONE DELLA FACOLTA DI AGRARIA, UNIVERSITA DI NAPOLI-PORTICI. — Atti del simposio Napoli-Portici (20-21 aprile 1972), Portici-Napoli, C. I. C. R. A., 1972, 273 p.

Le centre international pour la coopération des recherches en agriculture a été créé à l'issue du deuxième Congrès mondial de la Recherche agronomique (Rome, 1963). Pendant ce congrès, certains participants avaient exprimé leurs craintes devant l'évolution rapide des techniques agricoles et l'action nocive qu'elles pouvaient avoir sur la santé humaine. Ces craintes se sont trouvées confirmées et les détériorations du milieu sous l'action de l'homme sont préoccupantes. Ainsi, se trouve posé le problème des relations de l'homme avec la biosphère et le C. I. C. R. A. a retenu pour les réunions des trois prochaines années, l'étude des écosystèmes considérés sous leur aspect agricole.

Les rapports de ce symposium traduits en quatre langues, allemand, anglais, français, italien ont été les suivants :

— BRACONNIER (R.). — Le principe de l'écosystème.
— SIEGEL (O.). — L'utilisation optimale par l'agriculture des potentialités de la biosphère face à la pollution.
— ROTINI (O. T.). — L'érosion hydrogéologique.
— GOMEZ-CAMPO (C.), LAZARO (F.), MORALES (E.). — L'interaction agriculture-nature dans le biome méditerranéen espagnol.
— JELENIC (D. B.). — Études yougoslaves fondamentales sur l'environnement naturel de l'homme, la biosphère et ses écosystèmes régionaux.
— NISTRI (P. F.). — L'érosione eolica.
— BETTINI (T. M.), FERRARA (L.). — Élevage et production animale comme « système ».

J. L.

REES (A. R.). — THE GROWTH OF BULBS : APPLIED ASPECTS OF THE PHYSIOLOGY OF ORNEMENTAL BULBOUS CROP PLANTS. — London, Academic Press, 1972, 311 p. (Applied Botany Series, Vol. I, J. F. SUTCLIFFE dir.)

Ce premier volume d'une série consacrée à des monographies de botanique appliquée, traite de la croissance des plantes à bulbes ornementales. Les plantes bulbeuses ont été étudiées depuis longtemps, principalement aux Pays-Bas et les comptes-rendus des travaux effectués sur ces plantes ont paru d'abord dans des revues néerlandaises. Puis les anglais se sont intéressés à cette culture et les recherches dans ce domaine se sont étendues.

Le présent ouvrage présente les aspects scientifiques de la culture des plantes à bulbe, leur traitement et le forçage. Il porte surtout sur des espèces cultivées en Angleterre, mais aussi sur des bulbes cultivés ailleurs, notamment aux Pays-Bas, aux États-Unis, en Israël et au Japon.

Un premier chapitre traite de l'origine et de la distribution actuelle des plantes ornementales à bulbes. Le second chapitre est consacré à la structure, la morphologie, le développement et la périodicité ainsi qu' au développement floral. Les trois chapitres suivants sont consacrés à la conservation des bulbes, à leur développement après le stockage, au forçage et enfin à la physiologie et au métabolisme des bulbes conservés. Enfin, les deux derniers chapitres traitent des maladies physiologiques, des maladies et des animaux nuisibles aux bulbes.

L'ouvrage est complété par une abondante bibliographie (20 p.)

J. L.

TERNISIEN (J.). — ENVIRONNEMENT ET NUISANCES. — Paris, Guy Le Prat, 1971, 250 p. (Précis général des nuisances, bibliothèque de l'environnement).

Cet ouvrage, tome I du *Précis général des nuisances* fait le point des travaux poursuivis par les experts depuis 1968 dans divers groupes de travail nationaux et internationaux. Il introduit les domaines principaux qui trouveront leurs développements dans les ouvrages qui suivront. Chacun des sept chapitres débutent par un paragraphe consacré à la terminologie s'y rapportant. Les titres en sont les suivants :

— Biosphère et écologie.
— Population et société.
— Environnement et « altéralogie ».
— Activités humaines et nuisances.
— Sites et aménagements.
— Recherche et normalisation.
— Contrôle et réglementation.

L'ouvrage est complété par cinq annexes ayant pour titre :

— Terminologie adoptée par le groupe de travail : « Environnement-Nuisances » du Conseil international de la langue française après enquête internationale.
— Actions de recherches développées par la délégation générale à la recherche scientifique et technique.
— Liste des normes AFNOR concernant la prévention des nuisances industrielles.
— Liste des lois et réglements en vigueur concernant la lutte contre les « nuisances ».
— Principales publications sur les pollutions et « nuisances ».

J. L.

BOSSAVY (J.), CORMIS (L. de), CREPEY (J.), LAPOIX (F.), TERRASSON (F.), VIEL (M. G.). — LES NUISANCES DANS LES ACTIVITÉS RURALES. — Paris, Guy le Prat, 1972, 314 p. (Précis général des nuisances, bibliothèque de l'environnement, TERNISIEN (J. A.) dir.)

Cet ouvrage, quatrième tome d'un *Précis général des nuisances* est consacré à l'étude des nuisances dues aux activités rurales.

Les modifications apportées à la technologie agricole pour augmenter les rendements : emploi d'engrais, de pesticides..., n'ont pas été sans conséquences et il en est résulté des problèmes tels que la pollution des eaux et les résidus de pesticides dans les produits alimentaires.

Le présent volume comprend cinq chapitres dont la rédaction a été confiée à des spécialistes. Les titres en sont les suivants :

— BOSSAVY (J.). — Pollution des eaux dues aux activités rurales et protection des eaux. Hydraulique et hydrologie en milieu rural.
— CORMIS (L. de). — La pollution de l'air et les végétaux.
— LAPOIX et TERRASSON (M. N. H. N.). — Destruction et protection de la faune.
— CREPEY (J.). — Pollution et protection de la chaine alimentaire.
— VIEL (M. G.). — Nuisances dues aux pesticides dans les aliments et les chaînes alimentaires.

J. L.

GUINOCHET (M.), VILMORIN (R. de). — FLORE DE FRANCE. — Fascicule I. Paris, Éditions du C. N. R. S., 1973, 366 p.

Ce volume comprend une clé d'identification des unités phytophysiologiques, puis une clé des familles et ensuite celle des genres et des espèces.

Il est le premier fascicule d'une Flore de France qui se terminera par un glossaire des termes techniques et un index alphabétique.

Ce premier volume décrit les familles de Ptéridophytes, de Gymnospermes et de quelques Angiospermes. La classification des Ptéridophytes est celle adoptée par LAWALRÉE qui a rédigé ce groupe dans cet ouvrage ; la classification de L. EMBERGER a été adoptée pour exposer les familles de Spermaphytes car elle fait appel aux données de morphologie comparée des végétaux.

Les Angiospermes sont ainsi subdivisés en 18 phylums répartis en 5 grandes lignées indépendantes.

Pour chaque description de genre, la distribution géographique a été indiquée sommairement. La distribution altitudinale des espèces a été exprimée en termes d'étages de végétation.

J. L.

USHER (M. B.). — BIOLOGICAL MANAGEMENT AND CONSERVATION. ECOLOGICAL THEORY, APPLICATION AND PLANNING. — London, Chapman and Hall ed., 1973, 394 p.

L'intérêt croissant du public pour l'environnement et la protection de la nature nécessite à la fois l'utilisation de nouveaux systèmes d'analyse des phénomènes écologiques à grande échelle et la recherche des moyens d'application, afin de préserver les équilibres naturels. La quantification des données écologiques, la simulation à partir de modèles théoriques, dans un domaine où le nombre de variables intervenant est considérable, sont aujourd'hui réalisables grâce aux possibilités de traitement automatique des informations. Cet ouvrage présente les applications de ces nouvelles techniques à la conservation des équilibres biologiques et à l'exploitation des ressources naturelles. Les exemples choisis dans les trois parties de cet ouvrage ont trait à des problèmes de conservation de la nature en Grande-Bretagne.

I. *Écologie théorique :* Ce chapitre est consacré à l'analyse des systèmes écologiques. L'étude de la répartition et de la distribution des populations dans l'espace et dans le temps est élargie au concept d'écosystème, à la classification des écosystèmes et à leur réponse à l'exploitation.

II. *Écologie appliquée :* Les possibilités d'application des principes écologiques définis dans le précédent chapitre sont développées dans le cadre de la conservation et l'utilisation des ressources naturelles, mais également en relation avec les aspects législatifs, économiques et sociaux.

III. *Organisation :* Un projet d'exploitation des ressources naturelles suivi d'un exemple d'application d'un tel projet en Grande-Bretagne précise les moyens à mettre en œuvre pour assurer une production continue en liaison avec les besoins de l'homme et son environnement.

L'ouvrage se termine par deux appendices, l'un sur le calcul matriciel, l'autre sur quelques tables usuelles utilisées en statistique.

J. L. G.

PROGRAMME BIOLOGIQUE INTERNATIONAL. — Troisième volume des travaux de la recherche coopérative sur programme nº 40 « Ecologie du sol » 1971-72. Nouveaux documents pour une étude intégrée en écologie du sol. Paris, C. N. R. S., 1973, 288 p.

Ce troisième volume des travaux de la Recherche Coopérative sur programme nº 40, Écologie du sol, débute par un article consacré aux principes de méthodologie en microbiologie du sol. On trouve ensuite un article traitant de la mesure de la fixation de l'azote moléculaire en forêt. Le troisième article est consacré à l'étude écologique de la strate muscinale dans une pinède sur calcaire lusitanien en Lorraine. Le quatrième article traite de l'étude de la décomposition naturelle et expérimentale des feuilles de *Brachypodium pinnatum* P. B. (microécologie et micromorphologie étudiées à l'aide des microscopes électroniques). Enfin le dernier article est consacré aux recherches sur la dynamique et le bilan de l'eau des sols de deux écosystèmes méditerrannéens à chêne vert.

J. L.

VAILLANT (J. R.). — PROTECTION DE LA QUALITÉ DES EAUX ET MAÎTRISE DE LA POLLUTION. CONTROLE DES DÉVERSEMENTS D'EAUX POLLUÉES. — Paris, Eyrolles, 1973, 403 p. (Collection du bureau central d'Études pour les équipements. B. C. E. O. M.).

L'ouvrage débute par l'examen des critères de la qualité des eaux ; l'accent est mis sur l'adaptation de la qualité de l'eau à l'usage qu'on veut en faire (eau potable, eau d'irrigation, eau industrielle, eau nécessaire aux services de voirie, plans d'eau destinés aux loisirs). Puis, les divers types de pollution sont décrits : pollutions organique, chimique, physique, thermique, radioactive, microbienne.

L'auteur passe ensuite en revue la protection des eaux contre la pollution par les micropolluants toxiques, les pesticides, les engrais chimiques, les détergents, les phénols, les hydrocarbures, ainsi que la protection des eaux souterraines contre la pollution par les décharges d'ordures ménagères, et la protection sanitaire contre les rayonnements ionisants et les composés cancérigènes.

Cet ouvrage montre en outre les aspects juridiques et réglementaires, financiers, économiques, sociaux et internationaux du très vaste problème ainsi traité.

Anal. Ed.

SLATYER (R. E.), éd. — RÉPONSE DES PLANTES AUX FACTEURS CLIMATIQUES. — Série « Écologie et Conservation », nº 5, Actes Coll. Uppsala, 15-20 sept., 1970, Paris U. N. E. S. C. O., 574 p., 1973.

Ce colloque U. N. E. S. C. O. organisé en collaboration avec le gouvernement suédois, et en consultation avec la F. A. O. et l'O. M. M. a rassemblé 130 participants de 25 pays différents. Soixante-sept communications de spécialistes de la physique du milieu, de l'agroclimatologie, de biologistes et physiologistes sont rassemblés dans cet ouvrage de la manière suivante :

Une première partie concerne les réponses physiologiques fondamentales des plantes à trois facteurs climatiques importants : l'action de la température, de la lumière et de l'eau sur la croissance, le développement et le rendement (trois sections d'une dizaine d'articles chacune).

La seconde partie est consacrée à l'évaluation de ces facteurs en agroclimatologie (en particulier pour les céréales). Deux sections d'une dizaine d'articles chacune, sur l'estimation et les méthodes de mesure des facteurs rayonnement-température d'une part et du facteur eau d'autre part.

J. L. G.

WALSH (L. M.), BEATON (J. D.), éd. — SOIL TESTING AND PLANT ANALYSIS. — Madison, Soil Sci. Soc. Am., 491 p., 1973 (revised édition).

La première édition de cet ouvrage rassemblait une collection d'articles tirés de plusieurs congrès des années 1960 sur l'analyse des sols, des plantes et des tissus.

Cette présente édition comporte surtout des articles révisés ou mis à jour par les auteurs de la première édition. Son but est de rassembler les connaissances et les expériences fondamentales sur l'utilisation des analyses de sols et de plantes comme moyen de mieux maîtriser l'évaluation de l'état nutritionnel des plantes cultivées et des besoins en engrais.

On y trouvera tout d'abord dans les 13 premiers chapitres des données générales sur l'analyse des sols et les méthodes expérimentales (principes, variabilité des éléments assimilables,interprétation des résultats, méthodes d'échantillonnage) puis la description des principaux essais (pH, NPK, macro- et oligo- éléments). Cette première partie se termine par une réflexion sur l'interprétation des données et les conséquences pratiques que l'on peut en tirer.

Les 13 chapitres suivants traitent de l'analyse des plantes, d'abord des questions générales, puis de cultures particulières comme moyen de guider la fertilisation (betterave, canne à sucre, coton, soja et arachide, céréales, maïs et sorgho, plantes potagères, vergers, plantes fourragères, forêts).

Les deux derniers chapitres sont consacrés l'un à l'utilisation d'ordinateurs pour le traitement des résultats des essais, l'autre à l'organisation et la marche d'un laboratoire d'analyse complet.

Cet ouvrage comprend une liste des noms communs et scientifiques des plantes cités, une table de conversion des unités utilisées, et une liste des auteurs avec leurs adresses.

J. L. G.

HORTICULTURAL RESEARCH INTERNATIONAL. — DIRECTORY OF HORTICULTURAL RESEARCH INSTITUTES AND THEIR ACTIVITIES IN 54 COUNTRIES. — International Society for horticultural Science, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 1972, 537 p.

La Société internationale des Sciences horticoles publie une deuxième édition revue et augmentée de l'annuaire des activités de recherche internationale en horticulture. Les adresses d'environ 1 300 Instituts de recherches y sont répertoriées ainsi que le nom et les principaux sujets d'étude de 10 000 chercheurs. L'accès aux informations contenues dans cet ouvrage est facilité par la présence d'un index par nom de chercheurs et d'un index géographique (pays et lieux d'implantation des organismes de recherches).

H. P.

COOPER (A. J.). — ROOT TEMPERATURE AND PLANT GROWTH. — East Malling, Maidstone, Kent., Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, Research review, nº 4, 1973, 73 p.

Cette publication est une revue bibliographique concernant la température racinaire et son influence sur la plante. Elle comprend quatre parties, illustrées de nombreux graphiques :

— influence de la température racinaire sur la croissance de la plante,
— influence de la température racinaire sur les processus physiologiques de la plante,

— conditions naturelles de la température racinaire,
— contrôle pratique de la température racinaire.

Dans la première partie, l'auteur étudie les changements produits au niveau de la plante à la suite de variations expérimentales de la température racinaire ; ces modifications concernent notamment le poids sec de la plante, le rapport tige-racine, la hauteur du plant, la taille, forme et couleur des feuilles, l'extension, la ramification et la couleur des racines, la floraison et la fructification.

La seconde partie concerne les conséquences de variations thermiques racinaires sur certains processus physiologiques fondamentaux comme la photosynthèse, la respiration, l'absorption et le transport de l'eau ainsi que la transpiration.

Enfin l'auteur considère les relations entre la température du sol et la température des racines au cours de la journée et propose dans la quatrième et dernière partie quelques méthodes pratiques de contrôle par l'utilisation de containers, de plantes de couverture, mulches et par l'arrosage.

A. R.

Ann. agron., 1973, **24** (6).

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE

Ch. BALDY. — Sur l'énergie active en photosynthèse. Son utilisation par des graminées au cours de leur développement. Cas particulier de peuplements de Blé 1

Ch. BALDY. — Progrès récents concernant l'étude du système racinaire du Blé (*Triticum* sp.) 241

Ch. BALDY. — Contribution à l'étude de l'extinction de l'énergie d'origine solaire dans des peuplements de blé tendre (*Triticum aestivum* L. em. THELL) 507

BUI HUU TRI, G. MONNIER. — Étude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. I. — Paramètres définissant la structure granulaire et leur relation avec la porosité du sol 401

BUI HUU TRI, G. MONNIER. — Étude quantitative de la granulation des sols sous prairies de graminées. II. — Les paramètres de granulation en relation avec la constitution physique du sol et le système racinaire 651

R. CALVET. — Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs. I. — Étude de l'hydratation de la montmorillonite saturée par des cations monovalents 77

R. CALVET. — Hydratation de la montmorillonite et diffusion des cations compensateurs. II. — Étude de la diffusion des cations compensateurs dans la montmorillonite 135

J. ČATSKÝ, Ph. CHARTIER, A. DJAVANCHIR. — Assimilation nette, utilisation de l'eau et microclimat d'un champ de maïs. IV. — Évolution diurne de la résistance stomatique et du déficit de saturation des feuilles ; conséquences sur la fixation du CO_2 287

J. P. CAUSSANEL, D. CLAIR, G. BARRALIS. — Étude de la compétition en serre entre le blé d'hiver et une adventrice précoce (*Veronica hederaefolia* L.) ... 689

Ph. CHARTIER. — Rectificatif à propos de l'article « Étude du microclimat lumineux dans la végétation » paru dans les *Annales agronomiques*, 1966, **17** (5), 571-602 395

P. CHASSIN. — Étude de l'hydratation de la montmorillonite calcique en présence déthylène-glycol 425

C. CHIANG, F. MOUGENOT, F. DUPRET, L. GERMAIN. — Écologie microbienne des sols du Maroc. II. — Simulation digitale de la migration hivernale des nitrates 679

J. DECAU, B. PUJOL. — Effets comparés de l'irrigation et de la fumure azotée sur les productions qualitatives et quantitatives de maïs de variétés différentes. II. — Production de protéines 359

J.-C. FAVROT, J.-P. LEGROS, M. DUPUIS. — Contribution à l'étude des sols de la nappe détritique bourbonnaise 33

L. Gachon. — Vieillissement de divers engrais phosphatés en relation avec le type de sol étudié par la méthode Chang et Jackson 585
J. Guyot, J. Depou, Ph. Lamy. — Contribution à l'étude des phénomènes de surface de la matière organique des sols : interactions substances humiques éthylène-glycol 547
J. Habib. — Les écoulements de filtration dans le Kaolin et la Loi de Darcy .. 615
J.-G. Huguet. — Étude des facteurs modifiant la composition de la sève de printemps des arbres fruitiers 477
J.-G. Huguet. — Nouvelle méthode d'étude de l'enracinement des végétaux pérennes à partir d'une tranchée spirale 707
A. Langlet. — Effets de la sécheresse sur la croissance et la production du sorgho-grain 307
Elisabeth Lefebvre-Drouet. — Étude des variations de la composition minérale, protidique et glucidique des racines et parties aériennes du Dactyle. II. — Étude de l'évolution des glucides de réserve 63
P. Lencrerot, J. Decau, B. Cochard, J.-R. Marty, B. Pujol. — Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'implantation et de développement du tournesol sur sa production quantitative et la composition oléoprotéique de sa graine 339
D. Magniant, P. Dutil, M. Jamagne. — Étude d'un sol lessivé glossique développé sur limon éolien en forêt de Trois-Fontaines (Marne) 219
J. Maurice. — Corrélation entre le bore total des sols cultivés et le bore total des roches du Massif Armoricain 465
Suzanne Mériaux. — Sur le processus de fonctionnement des drains en sol lessivé hydromorphe 639
G. Monnier, P. Stengel, J.-C. Fiès. — Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol 533
F. de Montard, R. Arnaud. — Quelques aspects de la compétition entre plantes spontanées et plantes semées dans les prairies temporaires de dactyle et de fétuque élevée dans les Monts Dore. Influence du rythme de pâture et de la fertilisation azotée 571
F. Mougenot, A. Gallez. — L'accumulation sélective du magnésium dans les sols : mécanisme et influence sur la croissance et la nutrition du ray-grass d'Italie 457
J. Puech, M. Hernandez. — Évapotranspiration comparée de différentes cultures et étude de quelques facteurs influençant les rythmes de consommation 437
J. Servant. — Le profil salin des sols. Méthodes d'étude et signification application aux sols halomorphes du midi de la France 375

Mise au point bibliographique.

J.-C. Marchon. — L'activation de l'azote moléculaire par le système du titanocène 277

Chroniques des Livres 397, 503, 733

CONTENTS

Ch. BALDY. — On active photosynthetic energy. Its use by graminages during their growth. Special case of wheat 1

Ch. BALDY. — Latest research developments into the root systems of wheat (*Triticum*) sp..... 241

Ch. BALDY. — Contribution to the study on the extinction of energy of solar origin in populations of common wheat (*Triticumaestivum* L. EM. THIELL.) 507

BUI HUU TRI, G. MONNIER. — Quantitative study of soil granulation under grasses. I. — Granulation parameters and their relation with soil porosity. 401

BUI HUU TRI, G. MONNIER. — Quantitative study of soil granulation under grasses. II. — Granulation parameters and their relation with soil physical characteristics and root systems 651

R. CALVET. — Hydration of montmorillonite and diffusion of exchangeable cations. I. — Hydration of montmorillonite saturated by monovalent cations 77

R. CALVET. — Hydration of montmorillonite and diffusion of exchangeable cations. II. — Diffusion of exchangeable cations in montmorillonite 135

J. ČATSKÝ, Ph. CHARTIER, A. DJAVANCHIR. — Net assimilation, water use and microclimatology of a maize canopy. IV. — Diurnal courses of stomatal resistances and water saturation deficit of leaves ; effects upon net assimilation 287

J.-P. CAUSSANEL, D. CLAIR, G. BARRALIS. — Study in the greenhouse of the competition between winter wheat and an early weed (*Veronica hederaefolia* L.) 689

Ph. CHARTIER. — Rectification about the article : « Study of the light microclimate in a plant canopy ». Published in *Annales agronomiques*, 1966, **17** (5), 571-602 395

P. CHASSIN. — Study of the hydration of calcium montmorillonite in the presence of ethylene glycol 425

C. CHIANG, F. MOUGENOT, F. DUPRET, L. GERMAIN. — Microbial ecology of soil in Morocco. Digital simulation of nitrate migration during winter 679

J. DECAU, B. PUJOL. — The effects of irrigation as compared with those of nitrogenous fertilizers, on the qualitative and quantitative yield of different varieties of maize. II. — Yied of protein 359

J.-C. FAVROT, J.-P. LEGROS, M. DUPUIS. — Contribution to investigation of the detrital sheet in the Bourbonnais (in France) 33

L. GACHON. — Ageing of diverse phosphate fertilizers in relation to the type of soil, studied by the Chang and Jackson method 585

J. GUYOT, J. DEJOU, Ph. LAMY. — Contribution to the study of the surface phenomena of the organic matter of soils : humic substances-ethyleneglycol interactions 547

J. HABIB. — The filtration flow of pure water through Kaolin and Darcy's Law 615

J.-G. HUGUET. — Study of factors modifying the composition of spring sap of fruit-trees 477

J.-G. — HUGUET. — New method of studying the rooting of perenal plants by means of a spiral trench 707

A. LANGLET. — Drought effects on the growth and yield of grain sorghum 307

Elisabeth LEFEBVRE-DROUET. — Study of the variations in the mineral, protide and glucide composition of the roots and aerial part of Dactylis. II. — Study of the variations in stored glucids 63

P. LENCREROT, J. DECAU, B. COCHARD, J.-R. MARTY, B. PUJOL. — Contribution to the investigation of the effects of the planting and growth conditions of the sunflower with regard to quantitative yield and oleoprotein composition of its seed 339

D. MAGNIANT, P. DUTIL, M. JAMAGNE. — Study of a glossic leached soil formed on eolian loam in the « Trois-Fontaines » forest (Marne, France) 219

J. MAURICE. — Correlation between total boron of cultivated soils and total boron of the rocks of the Armorican Massif 465

Suzanne MERIAUX. — Functionning process of drainage in hydromorphic washed soil 639

G. MONNIER, P. STENGEL, J.-C. FIÈS. — A method of measuring the apparent density of small earthy agglomerates. Analysis of soil porosity systems ... 533

F. de MONTARD, R. ARNAUD. — Some aspects of the competition between spontaneous plants and plants sown in temporary Dactyl grassland and elevated Fescue in the Dore mountains. Effect of pasture rhythm and nitrogenous fertilization 571

F. MOUGENOT and A. GALLEZ. — Selective storing of magnesium in soils : mechanism and influence on growth and nutrition of Italian ray-grass 457

J. PUECH, M. HERNANDEZ. — Compared evapotranspiration of various crops and study of water-consumption rates 437

J. SERVANT. — Salt profiles of soils. Investigation methods and level of significance : application to halomorphic soils in southern France 375

Bibliographical review.

J.-C. MARCHON. — Activation of molecular nitrogen using « Titanocene » 277

Book reviews 397, 503, 733

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 29,7, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles *séparées* seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement*, dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *résumé :* (250 mots max.) suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusions ;* f) *titre et résumé* en anglais ou destinés à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français *très complet*. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (Dupont et Duval, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la *World List of Scientific Periodicals*, ou le *Bulletin Signalétique du C. N. R. S.* ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés soit *à l'état définitif* soit *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des *Annales* est : 12,5 × 19,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur une même feuille séparée et porter les numéros des figures.

Il est demandé d'indiquer sur le manuscrit, dans la marge, en regard du texte, l'emplacement souhaité des tableaux et figures.

Envoi du manuscrit : M. Hénin, Centre national de Recherches agronomiques, 78000 Versailles, France. On demande deux exemplaires.

Correction des épreuves : les épreuves que les auteurs recevront à corriger sont à retourner, après correction, à cette même adresse.

Le Directeur de la publication : M.-L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 2-1974

Dépôt légal : 1er trimestre 1974. N° d'impression : 1993.